



Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal



“Efectos del termotratamiento sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas en la madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* proveniente de plantaciones forestales”

**Trabajo final de graduación para optar por el título de
Maestría en Ciencias Forestales con el grado académico de
Maestría**

Luis Diego Méndez Mejías

Cartago, Costa Rica

Diciembre, 2016

Resumen

En recientes años han surgido nuevas técnicas y procesos como lo es el tratamiento térmico con el fin de modificar y mejorar las propiedades de la madera. Este estudio evaluó el efecto del termotratamiento sobre las propiedades físicas (densidad, contracción, pérdida de masa, absorción de humedad), color medido por el sistema CieLab, durabilidad determinada por ensayos acelerados de resistencia a la pudrición, propiedades mecánicas como MOR y MOE en flexión, adhesión por tensión y propiedades químicas por FTIR en las maderas de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*. Muestras de madera de albura y de duramen, aserradas bajo patrones de corte radial y tangencial para la especie de *T. grandis* y muestras de madera aserradas bajo los patrones de corte radial y tangencial para *G. arborea* fueron expuestas a cuatro niveles de temperatura (205, 210, 215 y 220° C) y (185, 190, 195 y 200 °C) respectivamente, además de muestras control (sin termotratamiento) para cada especie. Los resultados mostraron que la densidad varió entre 0,61 g cm⁻³ a 0,49 g cm⁻³ y de 0,43 g cm⁻³ a 0,47 g cm⁻³ para *T. grandis* y *G. arborea* respectivamente, con una tendencia de disminución con el aumento de la temperatura del termotratamiento en ambas especies. El porcentaje de contracción fluctuó entre 2,61 a 1,20% y de 2,40 a 1,62 % para *T. grandis* y *G. arborea* respectivamente, donde la madera de duramen con patrón de corte tangencial termotratada a 220°C para la especie de *T. grandis* y la madera de *G. arborea* con patrón de corte tangencial termotratada a 195 °C mostraron los mayores porcentajes de contracción en cada especie. El porcentaje de pérdida de masa varió entre 11,55 a 14,32 % y de 7,75 a 14,09 % para *T. grandis* y *G. arborea* respectivamente, reflejando un aumento en el porcentaje de pérdida de masa con el aumento de la temperatura de termotratamiento. En tanto el porcentaje de absorción varió entre 1,05 a 2,66 % para *T. grandis* y entre 1,39 a 2,37% para *G. arborea* mostrando una disminución para *T. grandis* y un comportamiento irregular en *G. arborea*, al aumentar la temperatura de termotratamiento. El cambio de color total (ΔE^*) de la madera varió de entre 21,91 a 40,92 y de 24,95 a 30,24 para *T. grandis* y *G. arborea* respectivamente, ocurriendo un aumento en el cambio total de color conforme aumenta la temperatura de termotratamiento. El cambio de color mostro los mayores cambios en el parámetro de luminosidad (ΔL^*), en tanto el enrojecimiento (Δa^*) y la amarillez (Δb^*) mostraron menores cambios de coloración. El MOR fluctuó entre 44,18 a 76,63 MPa y de 49,70 a 60,68 MPa para *T. grandis* y *G. arborea* respectivamente, afectado mayormente en madera de duramen con corte radial de *T. grandis* y madera de *G. arborea* con corte tangencial termotratada a temperaturas de 220 y 200°C respectivamente. En tanto los valores MOE fluctuaron entre 3,07 a 3,78 GPa y entre 6,94 a 8,52 GPa para *T. grandis* y *G. arborea* respectivamente reflejando los valores más bajos en madera de albura con corte tangencial termotratada a 205 °C para *T. grandis* y en la madera sin termotratar

con corte tangencial para *G. arborea*. La resistencia a la tensión presentó una variación entre 2,46 a 11,52% y de 4,13 a 8,69 % para *T. grandis* y *G. arborea* respectivamente, con una tendencia de disminución con el aumento de la temperatura del termotratamiento en ambas especies. En tanto se encontró que el porcentaje de falla ocurrió mayormente en madera con valores superiores a 26%. La durabilidad de la madera, mostro que *Lenzites acuta* degradó en mayor grado la madera en relación a *Trametes versicolor*. Del mismo modo se obtuvo que la especie *G. arborea* es más susceptible a la degradación en comparación con *T. grandis*. Las bandas 1053 y 1108 cm^{-1} en la madera termotratada presentaron los mayores valores de intensidad independientemente de la especie, tipo de madera o tipo de corte, en relación a las diferentes temperaturas de termotratamiento, indicando modificación química con el termotratamiento. Finalmente se encontró que el tratamiento térmico influye en las propiedades físicas, mecánicas y químicas de la madera mejorando en algunos casos la calidad de las mismas y en otras afectándolas, sin embargo, se deben tomar en cuenta las condiciones del proceso, así como las temperaturas y tiempo de exposición de la madera de acuerdo a la especie y el objetivo del mismo con el fin de poder obtener los mejores resultados.

Palabras clave: Madera, tratamiento térmico, estabilidad dimensional, durabilidad, contracción, color, densidad.

Abstract

In recent years, new techniques and processes have emerged, such as heat treatment to modify and improve the properties of wood. This study evaluated the effect of thermo-treatment on physical properties (density, shrinking, mass loss, moisture absorption) color measured by the CieLab system, durability by accelerated testing of natural rot resistance, mechanics such as MOR and MOE in flexion, stress adhesion and chemicals by FTIR in wood of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea*. Sapwood and heartwood samples, sawn under radial and tangential cutting patterns for *T. grandis* species and wood samples sawn under the radial and tangential cutting patterns for *G. arborea* were exposed to four temperature levels (205, 210, 215 and 220 ° C) and (185, 190, 195 and 200 ° C) respectively, plus control samples (without thermo-treatment) for each species. Results showed that density varied from 0.61 g cm^{-3} to 0.49 g cm^{-3} and from 0.43 g cm^{-3} to 0.47 g cm^{-3} for *T. grandis* and *G. arborea* respectively, with a declining trend as temperature of the thermo-treatment increases in both species. Shrinking percentage fluctuated between 2.61 to 1.20% and from 2.40 to 1.62% for

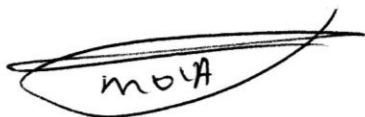
T. grandis and *G. arborea* respectively, where heartwood timber with tangential cutting pattern thermo-treated at 220°C for *T. grandis* species and *G. arborea* timber with tangential cutting pattern thermo-treated at 195 °C showed the highest shrinking percentages in each species. Mass loss percentage ranged from 11.55 to 14.32 and from 7.75 to 14.09 for *T. grandis* and *G. arborea* respectively, reflecting an increase in the mass loss percentage with the increasing of the thermo-treatment temperature. Likewise, the absorption percentage varied from 1.05 to 2.66 % for *T. grandis* and from 1.39 to 2.37 % for *G. arborea* showing a decrease for *T. grandis* and an irregular behavior in *G. arborea*, when raising the heat treatment temperature Total color change (ΔE^*) of wood varied from 21.91 to 40.92 and from 24.95 to 30.24 % for *T. grandis* and *G. arborea* respectively, reporting an increase in total color change as the heat treatment temperature increases. The change in color showed the largest changes in the brightness parameter (ΔL^*), while redness (Δa^*) and yellowing (Δb^*) showed minor color changes. MOR varied from 44.18 to 76.63 MPa and from 49.70 to 60.68 MPa for *T. grandis* and *G. arborea* respectively, affected mostly in heartwood timber with radial cut of *T. grandis* and *G. arborea* timber with tangential cut thermo-treated at temperatures of 220 and 200°C respectively. Meanwhile, MOE values ranged from 3.07 to 3.78 GPa and from 6.94 to 8.52 GPa for *T. grandis* and *G. arborea*, respectively, reflecting the lowest values in sapwood timber with tangential cut at 205 °C for *T. grandis* and in timber without heat treatment with tangential cut for *G. arborea*. Tension resistance showed a variation between 2.46 and 11.52 % and 4.13 to 8.69 % for *T. grandis* and *G. arborea* respectively, with a declining trend as the thermo-treatment temperature increases for both species. Moreover, it was found that failure percentage occurs mostly in wood with values higher than 26%. Durability of wood, showed that *L. acuta* degraded to a greater degree the wood in relation to *T. versicolor*. Likewise, it was obtained that *G. arborea* species is more susceptible to degradation compared to *T. grandis*. The bands of 1053 and 1108 cm⁻¹ in thermo-treated wood had the highest intensity values regardless of the species, type of wood or cutting type, in relation to the different thermo-treatment temperatures, indicating chemical modification with the heat treatment. Finally, it was found that the heat treatment influences the physical, mechanical and chemical properties of the wood improving in some cases the quality of the same and in others affecting them, however, we must consider the conditions of the process, as well as the temperatures and time of exposure of wood per species and the objective of the same to obtain the best results.

Keywords: wood, heat treatment, dimensional stability, durability, shrinking, color, density.

Esta Tesis de graduación ha sido aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal y Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Maestría.

Efectos del termotratamiento sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas en la madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* proveniente de plantaciones forestales

Miembros del Tribunal Evaluador



Roger Alonso Moya Roque, Dr.

Director de tesis

Escuela de Ingeniería Forestal, TEC



Freddy Muñoz Acosta, Dr.

Lector de tesis

Escuela de Ingeniería Forestal, TEC



Ricardo Starbird Pérez, Dr.

Lector de tesis

Escuela de Química, TEC



Alexander Berrocal Jiménez, Dr.

Lector de tesis

Escuela de Ingeniería Forestal, TEC



Luis Diego Méndez Mejías, Lic.

Estudiante de Maestría en Ciencias Forestales

Agradecimientos

A Dios, por darme fuerza en los momentos difíciles y permitirme seguir adelante a pesar de todos los obstáculos.

A mi familia por su apoyo incondicional en todos los momentos en que los necesite.

Al Ph. D. Roger Moya Roque, tutor de tesis, por su apoyo, confianza y guía en todo momento.

A todos los profesores de la carrera de Ingeniería Forestal, por su transmisión de conocimientos, consejos y buenos deseos.

Al personal del CIF y otros departamentos del TEC, por el apoyo y ayuda durante la realización de este proyecto.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y a la Unidad de Posgrado del TEC por el apoyo económico brindado a través de la Beca de Estudiante Asistente Especial de Investigación de Posgrado, la cual fue de gran importancia para el desarrollo de mis estudios.

A todas las personas que colaboraron de una u otra manera en el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros de postgrado, por su apoyo y por los momentos amenos compartidos.

"Pon en manos del Señor todas tus obras, y tus planes tendrán éxito"

Proverbios 16:3

Índice general

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Introducción.....	1
Materiales y métodos	4
Procedencia y características del material utilizado.....	4
Muestreo.....	4
Proceso de termotratamiento.....	5
Diseño Experimental	6
Determinación de densidad, contracción, pérdida de masa y absorción de humedad de la madera.	6
Medición de FTIR en la superficie de la madera	7
Cambio de color en la madera.....	9
Módulo de elasticidad y módulo de ruptura.....	9
Resistencia a la tensión y porcentaje de falla de la línea de cola en la madera	10
Ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural	11
Análisis Estadístico	12
Resultados	14
Determinación de densidad, contracción, pérdida de masa y absorción de humedad en madera termotratada.....	14
Determinación de los parámetros de color en madera termotratada.	17
Determinación del cambio total de color (ΔE^*) en madera termotratada.	19
Determinación del módulo de elasticidad y módulo de ruptura en flexión estática en madera termotratada.....	20

Determinación de la resistencia en tensión y porcentaje de falla de la línea de cola en madera termotratada.....	22
Determinación de la durabilidad en pruebas aceleradas de laboratorio en madera termotratada..	23
Determinación de FTIR en la superficie de la madera termotratada.....	25
Análisis de resultados.....	28
Determinación de densidad, contracción, pérdida de masa y absorción de humedad en madera termotratada.....	28
Determinación de los parámetros de color en madera termotratada y cambio de color total.....	30
Determinación del módulo de elasticidad y módulo de ruptura en flexión estática en madera termotratada.....	34
Determinación de la resistencia en tensión y porcentaje de falla de la línea de cola en madera termotratada.....	35
Determinación de la durabilidad en pruebas aceleradas de laboratorio en madera termotratada..	36
Determinación de FTIR en la superficie de la madera termotratada.....	37
Conclusiones	39
Recomendaciones	40
Referencias.....	41

Índice de Figuras

Figura 1. Procesamiento y muestreo realizado en la madera de <i>T. grandis</i> y <i>G. arborea</i>	5
Figura 2. Pérdida de masa en madera termo-tratada a diferentes temperaturas a) <i>G. arborea</i> y b) <i>T. grandis</i>	16
Figura 3. Porcentaje de absorción de humedad en madera termotratada a diferentes temperaturas a) <i>G. arborea</i> y b) <i>T. grandis</i>	17
Figura 4. Cambio total de color en madera termotratada a diferentes temperaturas en las especies a) <i>G. arborea</i> y b) <i>T. grandis</i>	20

Figura 5. Módulo de elasticidad y módulo de ruptura en madera termotratada a diferentes niveles de temperaturas a) MOE en <i>G. arborea</i> , b) MOE en <i>T. grandis</i> , c) MOR en <i>G. arborea</i> y d) MOR en <i>T. grandis</i>	21
Figura 6. Cambios en la relación de intensidad de las bandas (In/T1031) en diferentes temperaturas de termotratamiento para tipos de madera y tipos de corte en madera de <i>T. grandis</i>	26
Figura 7. Cambios en la relación de intensidad de las bandas (In/T1031) en diferentes temperaturas de termotratamiento para los tipos de corte en madera de <i>G. arborea</i>	27
Figura 8. Cambios de color en la madera de a) <i>T. grandis</i> y b) <i>G. arborea</i> , de acuerdo a las diferentes temperaturas de termotratamiento definidas.	33

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Resumen de las bandas infrarrojo observadas entre 800 to 1800 cm-1 en madera termotratada de <i>T. grandis</i> y <i>G. arborea</i>	8
Cuadro 2. Criterio de clasificación de la resistencia natural de la madera al ataque de los hongos de prueba en laboratorio (ASTM, 2003).	12
Cuadro 3. Densidad, y porcentaje de contracción para muestras de <i>T. grandis</i> y <i>G. arborea</i> según tipo de madera y tipo corte sometidas a 4 temperaturas de termotratamiento.	14
Cuadro 4. Valores de cambio de color según parámetros (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) para muestras de <i>G. arborea</i> y <i>T. grandis</i> según tipo de madera y tipo corte sometidas a un proceso de termo tratamiento a 4 diferentes niveles de temperatura.	18
Cuadro 5. Resistencia en tensión y porcentaje de falla para muestras de <i>G. arborea</i> y <i>T. grandis</i> según tipo de madera y tipo corte sometidas a un proceso de termo tratamiento a 4 diferentes niveles de temperatura.	22
Cuadro 6. Porcentaje de pérdida de masa por ataque de dos tipos de hongos en muestras de <i>G. arborea</i> y <i>T. grandis</i> según tipo de madera sometidas a un proceso de termo tratamiento a 4 diferentes niveles de temperatura.....	24

Introducción

La madera ha sido un material utilizado por la humanidad desde siglos pasados en diversas funciones como construcción, mueblería, energía, entre otros, y considerado aún como uno de los materiales más importantes como materia prima (Kránitz et al., 2015). Además, presenta excelentes propiedades mecánicas que permiten su uso en aplicaciones donde se requiere soporte de alta carga, o bien usos no estructurales como aislamiento termo-acústico, diseño, usos decorativos entre otros (Uribe y Ayala, 2015). No obstante, presenta como principal desventaja la absorción y desorción de agua lo que afecta directamente los cambios dimensionales que a su vez pueden provocar problemas como agrietamiento, alabeos entre otros que reducen la calidad y propiedades de la misma, lo que limita considerablemente su uso en algunas aplicaciones (Uribe y Ayala, 2015; Kocaefe et al., 2015), además de su susceptibilidad al daño por agentes bióticos y abióticos (Ortiz et al., 2014).

Debido a estos problemas, surgen nuevas técnicas y procesos para modificar y mejorar las propiedades de la madera e incentivar el uso de este material con la mejor calidad posible (Kocaefe et al., 2015). Uno de ellos es el tratamiento térmico utilizado como método de modificación de la madera que permite mejorar algunas características y propiedades como la estabilidad dimensional, permeabilidad, durabilidad natural entre otros (Korkut et al., 2008). obteniendo una mejor calidad natural de la madera (Noh et al., 2016), lo que permite su uso en exteriores debido a la reducción de su higroscopicidad (Olarescu et al., 2014). El tratamiento térmico, fue implementado en Europa a principios de 1990 y ha venido despertando un gran interés al permitir modificar la madera con un bajo impacto ambiental y de una manera financieramente viable (Kesik et al., 2014).

La modificación térmica o termotratamiento de la madera es un proceso mediante el cual la madera es tratada en una atmósfera de gas inerte de nitrógeno generalmente, a temperaturas de hasta 260 °C y tiempos de exposición variables (Ansell, 2012). Los parámetros utilizados en este proceso pueden diferir, por ejemplo, Esteves et al. (2014) y Kesik et al. (2014), indican temperaturas de termotratamiento entre un rango de 160-260 °C, durante tiempos de exposición de entre 2 y 6 horas en un ambiente con baja presencia de oxígeno. Por otro lado, Priadi y Hiziroglu (2013) reporta temperaturas de termotratamiento que varían entre 130 a 200 °C, con un tiempo de exposición de entre 2 y 8 horas. Debido a estos factores, Kesik et al. (2014), menciona que la temperatura y los tiempos de exposición del material durante el proceso de termotratamiento difiere según la especie y

las condiciones en que se ejecute el proceso, lo que permite ajustar el proceso en relación a las dimensiones de la madera, contenido de humedad y su posible uso.

Este proceso de modificación térmica de la madera es de gran importancia actualmente, sobre todo en algunos países nórdicos, debido a su bajo costo, en relación a tratamientos de impregnación química, que utilizan cantidades significativas de sustancias obteniendo como resultado un producto final más caro (Esteves et al., 2014). También, porque trae consigo una serie de mejoras en las propiedades de la madera como disminución de la contracción, mejor estabilidad dimensional y minimización de ataques por organismos fúngicos (Ansell, 2012 y Bakar et al., 2013). Estudios llevados a cabo por Esteves et al. (2014) en la especie *Pinus pinaster* confirman la mejora de las propiedades al termotratar la madera, en estos se reportó una mayor estabilidad dimensional y una disminución en la contracción volumétrica, la hinchazón y la densidad cuando la madera esta termotrada. Por su parte (Noh y Ahmad, 2016), también indican disminuciones de la densidad al termotratar madera de *Irvingia spp.* y *Dryobalanops spp.*

Sin embargo, uno de los inconvenientes que se le señala a la madera termotrada es la pérdida de resistencia mecánica. Kesik et al. (2014) termotrando madera de cuatro diferentes especies, a temperaturas de 130 °C a 160 °C por tiempos de 3 y 7 horas, encontró cambios en propiedades mecánicas como la dureza, con reducciones de entre 15 y 26%. Del mismo modo, Bekhta y Niemz (2003), en su investigación reportan disminuciones en resistencia a la flexión de 50% aproximadamente y de entre 4 y 7% en módulo de elasticidad para madera de *Picea abies* al termotratar a 200 °C respecto a madera termotrada a 100 °C. Por su parte, Gunduz et al. (2009), indicó disminuciones en resistencia de flexión y compresión con valores de 7,42% y 7,55% respectivamente para madera de *Pyrus elaeagnifolia* Pall. Así mismo, Hidayat et al. (2016), obtuvo disminuciones significativas en valores de módulo de ruptura y módulo de elasticidad al termotratar madera de *Cylicodiscus gabunensis* a una temperatura de 180 °C en tiempos de exposición de 3 y 4 horas.

Si bien es cierto, el termotratamiento provoca la disminución de algunas propiedades mecánicas de la madera limitando su uso, por lo que se debe tomar en cuenta la aplicación que va a tener el material (Baradit et al., 2013). Sin embargo, el termotratamiento produce un aumento en el valor estético y durabilidad natural de la madera (Olarescu et al., 2014), debido al cambio de color y cambios producidos en su estructura, ocasionados principalmente a la degradación de hemicelulosas (Salca et al., 2016) lo que mejora su apariencia y permite implementar su uso en diversas obras de ingeniería, construcción, arquitectura, entre otras.

Actualmente, este tipo de métodos no son utilizados en todos los países, a pesar de su excelente alternativa para mejorar las propiedades y características de la madera. Por ejemplo, en países pequeños como Costa Rica donde se cuenta con programas de reforestación que utilizan una gran variedad de especies para la producción de madera (Moya, 2004), esto podría convertirse en una alternativa para aumentar la competitividad de este tipo de madera en el mercado. En especies maderables como *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*, que han adquirido importancia comercial en diversos proyectos de reforestación en Costa Rica (Serrano y Moya, 2013), debido a su rápido crecimiento, su capacidad de adaptación a las zonas abandonadas (Moya y Tenorio, 2013). Así mismo dichas maderas han tenido una buena aceptación en el mercado, por lo que las convierte en especies propicias para evaluar la posibilidad de aplicar un termotratamiento para aumentar aún más sus propiedades (Serrano y Moya, 2013).

Ante tales circunstancias, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de cuatro temperaturas de termotratamiento para la madera *T. grandis* y *G. arborea* proveniente de árboles de plantaciones comerciales. Las propiedades sobre las que se evaluara el efecto del termotratamiento son físicas, mecánicas y químicas mediante normas estandarizadas ASTM y técnicas espectrométricas. Esta evaluación del termotratamiento pretende dar criterio técnico sobre un producto amigable con el ambiente, con mejores propiedades y características que permitan potencializar su uso y competir en el mercado nacional.

Materiales y métodos

Procedencia y características del material utilizado

La madera *T. grandis* y *G. arborea* fue obtenida de plantaciones forestales localizadas en la zona norte de Costa Rica, propiedad de la empresa Ethical Forestry S.A. Esta zona se ubica dentro de la zona de vida Bosque Húmedo Tropical Basal, registra una temperatura media anual entre 27 °C y 32 °C y precipitación de 3500 mm (Holdridge, 1967). La madera utilizada se obtuvo de árboles de segundo raleo de plantaciones de 11 y 8 años, con un espaciamiento de 3 x 3 metros (1100 árboles/hectárea).

Se seleccionaron trozas de 2,5 metros de largo y un diámetro promedio de 20 cm aproximadamente, de las que se encontraban dispuestas en los patios de acopio de la empresa. Una vez obtenidas las trozas se procedió a aserrar en tablas de aproximadamente 7,5 cm de ancho x 2,5 cm de espesor x 2,5 metros de largo. En el aserrío se consideró el patrón de corte para obtener madera de corte radial y tangencial. Además, se clasificó las tablas por albura o duramen. Las tablas fueron secadas siguiendo el programa de secado detallado por Salas y Moya (2014) para ambas especies. Luego de la madera seca fueron escogidas 30 tablas por cada tipo de corte y tipo de madera a las que se les aplicó el proceso de termotratamiento. Finalmente, las tablas fueron acondicionadas a un contenido de humedad de equilibrio de 12%.

Muestreo

Para la especie de *T. grandis* se analizó el termotratamiento para madera de albura y duramen y dentro de estos tipos de madera se analizó madera con patrones de corte radial y tangencial (Figura 1). Es importante tomar en cuenta que en el caso de la madera de albura solamente se contó con muestras de corte tangencial, ya que por el espesor de albura y las dimensiones de las trozas no fue posible la extracción de muestras con corte radial en la parte de albura.

En la madera *G. arborea* se analizó el termotratamiento únicamente para madera de albura con patrones de radial y tangencial (Figura 1), esto porque no es posible distinguir la diferencia entre madera de albura y duramen. De cada una de ellas se tomaron 30 tablas de aproximadamente 7,5 cm de ancho x 2,5 cm de espesor x 250 cm de largo. Cada una de estas tablas fue partida en 5 piezas de aproximadamente 7,5 cm de ancho x 2,5 cm de espesor x 50 cm de largo (Figura 1).

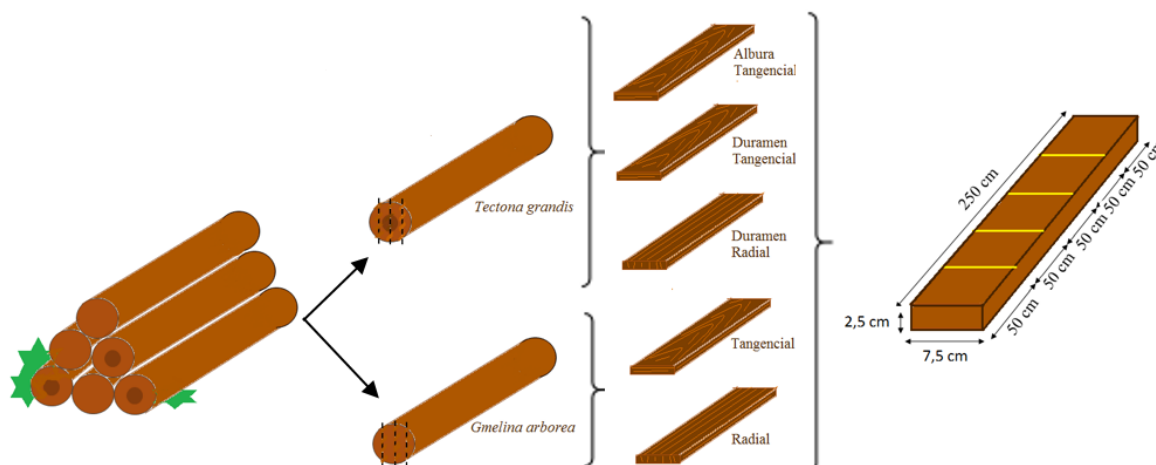


Figura 1. Procesamiento y muestreo realizado en la madera de *T. grandis* y *G. arborea*.

Proceso de termotratamiento

La madera aserrada en condición seca, aproximadamente 12% contenido de humedad, fue termotratada a cuatro diferentes niveles de temperatura 205 °C, 210 °C, 215 °C y 220 °C para la especie *T. grandis* y de 185 °C, 190 °C, 195 °C y 200 °C para *G. arborea*. Estas temperaturas fueron seleccionadas considerando previos resultados (Méndez-Mejías y Moya, 2016) donde encontraron rangos aptos de temperatura cada 5 °C. Los procesos de termotratamiento se realizaron de forma independiente por lo que cada uno correspondió a un ciclo de tratamiento. Las muestras se introdujeron y apilaron en un horno marca Volutech (con una precisión de ± 3 °C). Colocado el material dentro del horno, éste se programó según la temperatura de termotratamiento y el tiempo de duración. El proceso estuvo integrado por varias etapas, una vez encendido el horno se inició un proceso de secado de la madera de aproximadamente 17 horas a una temperatura de 0-130 °C hasta obtener un 0% de contenido de humedad (CH). Posteriormente, se aplicó un aumento de temperatura de 130°C a la temperatura definida para el tipo de termotratamiento con una duración de aproximadamente de 6 horas en pasar de una temperatura a la otra. Una vez alcanzada la temperatura máxima previamente programada, se mantuvo durante dos horas. Seguidamente, se pasó a una etapa de acondicionamiento durante 7 horas, en la que se aplicó vapor, agua y temperatura para hidratar la madera y lograr aproximadamente un 6% de contenido de humedad (CH) final. Finalmente, se aplicó un proceso de enfriamiento durante 3 horas. El proceso de termotratamiento fue realizado en condiciones libres de oxígeno, en presencia de nitrógeno. Las temperaturas de termotratamiento aplicadas fueron de 185, 190, 195 y 200 °C para la especie *G. arborea* y de 205, 210, 215 y 220 °C para la especie *T. grandis*. Además, cada especie contó con un tratamiento testigo (sin termotratamiento).

Diseño Experimental

El diseño experimental difirió para las dos especies en estudio, para el caso de la *T. grandis* fue un diseño factorial por bloques que constó de 2 factores: tipo de madera (con dos niveles: albura y duramen) y la temperatura de termotratamiento (con cinco niveles: Testigo, 205 °C, 210 °C, 215 °C y 220 °C), con 30 muestras para cada caso y dos bloques correspondientes al tipo de corte (radial y tangencial), el efecto de cada bloque fue analizado por aparte. Este diseño permitió estimar los 2 efectos principales (A y B), la interacción de estos dos factores (AB) y el efecto en el bloque (radial y tangencial).

Para la *G. arborea* fue un diseño factorial que constó de 2 factores: tipo de corte de la madera (con dos niveles: radial y tangencial) y la temperatura de termotratamiento (con cinco niveles: Testigo, 185 °C, 190 °C, 195 °C y 200 °C), con 30 muestras para cada caso. Este diseño permitió estimar los 2 efectos principales (A y B) y la interacción de estos dos factores (AB).

Determinación de densidad, contracción, pérdida de masa y absorción de humedad de la madera.

Para cada una de las tablas termotrataadas se midió la densidad, la contracción, la pérdida de masa y la absorción de humedad luego del proceso de termotratamiento. Para determinar la densidad, se midieron las dimensiones y la masa de cada una de las muestras luego del proceso de termotratamiento y se aplicó la ecuación 1:

$$Densidad (g\ cm^{-3}) = \left(\frac{Masa\ (g)}{Volumen\ (cm^3)} \right) \quad (1)$$

El porcentaje de contracción de la madera se determinó bajo la norma ASTM D143-94 (ASTM, 2007), para ello se midió el ancho de cada una de las muestras antes y después del termotratamiento y luego se aplicó la ecuación 2:

$$Contracción\ (\%) = \left(\frac{Dimensión\ antes\ (mm) - Dimensión\ después\ (mm)}{Dimensión\ antes\ (mm)} \right) * 100 \quad (2)$$

Para determinar el porcentaje de pérdida de masa, se pesó cada una de las muestras antes y después del termotratamiento y se aplicó la ecuación 3:

$$\text{Pérdida de masa (\%)} = \left(\frac{\text{Masa antes (g)} - \text{Masa después (g)}}{\text{Masa antes (g)}} \right) * 100 \quad (3)$$

La absorción de humedad se determinó de acuerdo a Tenorio et al. (2015), quién utilizó una escala de humedad, modelo MB45, fabricada por OHAUS (USA) que determina la humedad con respecto al masa inicial. Para ello se utilizaron 10 muestras acondicionadas al 12% con dimensiones de 2 cm x 2 cm x 2 cm, tanto en las condiciones de termotratamiento de *G. arborea*, como para las de termotratamiento de *T. grandis*. En este caso no se tomaron en cuenta los tipos de corte en la madera, ya que las dimensiones de las muestras utilizadas no permitieron definir la orientación según los tipos de corte. Las muestras se colocaron en un desecador que con una solución saturada de nitrato de potasio a 22 °C (21% de contenido de humedad en equilibrio). Las muestras fueron pesadas semanalmente hasta que alcanzaron una masa constante. Además, se obtuvo su masa antes y después de este período. El porcentaje de absorción fue calculado con la ecuación. 4:

$$\text{Absorción de humedad (\%)} = \left(\frac{\text{Masa a 21\% (g)} - \text{Masa inicial (g)}}{\text{Masa inicial (g)}} \right) * 100 \quad (4)$$

Medición de FTIR en la superficie de la madera

Para este análisis se prepararon 5 muestras con dimensiones de 1,5 cm de largo por 1,5 cm de ancho y 0,4 cm de espesor aproximadamente, para cada condición de termotratamiento, tipo de madera y patrón de corte en las dos especies estudiadas. Posteriormente, se realizó el análisis de espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR). Las muestras se midieron en su superficie con un Espectrómetro Nicolet 380 FTIR (Thermo Scientific) utilizando un aditamento dede reflectancia atenuada (equipado con un cristal de diamante). Todos los datos fueron registrados a temperatura ambiente, en el rango espectral de 4000-500 cm⁻¹. El equipo fue configurado para que realizara lecturas mediante la acumulación de 32 barridos con una resolución de 1 cm⁻¹, con una corrección de fondo antes de cada medición.

Los espectros de FTIR obtenidos fueron procesados con el software Spotlight 1.5.1, HyperView 3.2 y Spectrum 6.2.0 desarrollados por Perkin Elmer, Inc. La corrección de la línea base se aplicó de 1800-800 cm⁻¹ y se identificaron los principales componentes de vibración de las bandas. Estas bandas fueron seleccionadas con base a varios estudios donde se ha identificado este rango, que es donde ocurren los mayores cambios en la superficie de la madera (Calienzo et al. 2015; Li et al. 2015; Bonifazi et al., 2015 y Berrocal et al. 2016) y son detalladas en el cuadro 1. La altura de cada

pico para cada temperatura de termotratamiento de acuerdo a la especie, tipo de madera y tipo de corte fue registrado y estandarizado utilizando como referencia la intensidad de la banda a 1031 cm^{-1} (I_{1031}), dada su estabilidad en todas las condiciones de estudio. la relación entre los diferentes picos en el rango de $800\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ fue calculado con la ecuación 5, de tal modo que la banda a 1031 cm^{-1} fue utilizada en todos los casos para estandarizar las señales. Esta banda fue seleccionada por que no presentó diferencias significativas entre los tratamientos.

$$\text{Relación de intensidad} \left(\frac{I_n}{I_{1031}} \right) = \left(\frac{\text{Intensidad de los picos entre } 1800 \text{ y } 800\text{ cm}^{-1}}{\text{Intensidad de } 1031\text{ cm}^{-1}} \right) \quad (5)$$

Cuadro 1. Resumen de las bandas infrarrojo observadas entre $800\text{ to }1800\text{ cm}^{-1}$ en madera termotratada de *T. grandis* y *G. arborea*.

Posición (cm^{-1})	Banda asignada	Polímeros estructurales
810	C=O	Glucomanano
895	Estiramiento de C-H fuera del plano del anillo aromático.	Celulosa
1031	Estiramiento de C-O	Celulosa y hemicelulosa
1053	Vibración de estiramiento de C-O	Celulosa y hemicelulosa
1108	Esqueleto aromático y estiramiento de C-O	Polisacáridos y lignina
1158	Vibración de estiramiento de C-O-C	Celulosa y hemicelulosa
1231	Vibración de C-O en anillo syringyl	Lignina
1273	Estiramiento de C-O	Lignina
1318	Vibración de C-O	Lignina
1330	Vibración de C-H en la celulosa y vibración de C ₁ -O en estructuras derivadas-condensadas de syringyl	Lignina
1373	Deformación de C-H	Celulosa y hemicelulosa
1419	Deformación en el plano C-H con estiramiento del anillo aromático	Lignina y carbohidratos
1453	Deformación de C-H, asimetría en CH ₃ y CH ₂	Celulosa
1506	Vibración esquelética aromática (C=C)	Lignina
1595	Vibración esquelética aromática (C=C)	Lignina
1652	C=O conjugado en inquilinas junto con estiramiento de C=O de varios grupos	Hemicelulosa
1733	Vibración de estiramiento de C=O en los grupos carbonilo, carboxilo y acetilo	Xylan en hemicelulosas

Fuente: Calienno et al. 2015; Li et al. 2015; Bonifazi et al. 2015 y Berrocal et al. 2016.

Cambio de color en la madera

El color en la superficie de la madera fue medido a cada una de las tablas de los diferentes termotratamientos para ambas especies mediante el sistema de color CIE Lab. En la medición del color se utilizó un espectrofotómetro marca miniSkan XE Plus de HunterLab, con sistema cromatológico estandarizado CIE L*a*b. El rango de medición fue de 400 a 700 nm, con una apertura en el punto de medición de 11 mm. La observación de la reflexión incluyó el componente especular (SCI mode), en un ángulo de 10°, la cual es lo normal de la superficie del espécimen (D65/10); un campo de visión de 2° (Observador estándar, CIE 1931) y un nivel de iluminación D65 (correspondiente a Luz del día en 6500 Kelvin). El sistema de color CIE Lab permite la medición del color de forma tridimensional. Obtiene parámetros de luminosidad (L*) que representa la reflectancia de una muestra que oscila entre 0 para el negro y 100 para el blanco (un L* de 0 significa que la muestra no refleja la luz; un L* de 100 significa que la muestra refleja toda la luz incidente) y de coordenadas de color (a* y b*) que no tienen un rango específico. Las coordenadas a* se definen como el rojo/verde, donde valores de a* positivos tienden a colores rojizos y valores negativos a colores verduscos y de coordenadas b* que se definen como el amarillo/azul donde valores de b* positivos tienden a colores amarillentos y valores negativos a colores azulados (Chen et al., 2014).

El color se midió antes y después del termotratamiento y luego se cuantificó el cambio de color total (ΔE^*), acorde con la norma ASTM D 2244 (ASTM, 2005a) a través de la ecuación 6:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (6)$$

Donde:

$$\Delta L^* = L^*_{\text{después del termotratamiento}} - L^*_{\text{antes del termotratamiento}} \quad (7)$$

$$\Delta a^* = a^*_{\text{después del termotratamiento}} - a^*_{\text{antes del termotratamiento}} \quad (8)$$

$$\Delta b^* = b^*_{\text{después del termotratamiento}} - b^*_{\text{antes del termotratamiento}} \quad (9)$$

Módulo de elasticidad y módulo de ruptura.

Este método se determinó bajo la norma ASTM D143-14 (2014) utilizando el método B (dos puntos de apoyo). Para el caso de madera de *T. grandis* se prepararon probetas de 1,5 cm de ancho x 1,5 cm de espesor x 26 cm de largo, en tanto para *G. arborea* se prepararon probetas de 2,5 cm de ancho x 2,5 cm de espesor x 41 cm de largo. Esta variación en las dimensiones de las probetas para

cada especie se debió al material disponible. Se utilizó una luz entre apoyos de 15,5 cm para las probetas de *T. grandis* y de 36 cm para *G. arborea* y se les aplicó una carga constante a una velocidad de 1,3 mm/min. Para ello se utilizó una máquina universal de ensayos con sistema de registro de datos marca JBA, modelo 855.

El MOE se determinó en base a la ecuación 10 y el MOR fue determinado de acuerdo a la ecuación 11.

$$\text{MOE (GPa)} = \left(\frac{Plp * L^3}{4 * Dlp * a * h^3} \right) * 9,80665 * 10^{-5} \quad (10)$$

Donde:

Plp = Carga en el límite proporcional, en kg.

L = Luz del ensayo, en cm.

Dlp = Deformación en el límite proporcional, en cm.

a = Ancho de la probeta, en cm.

h = Altura de la probeta, en cm.

$9,80665 * 10^{-5}$ = Coeficiente de transformación a GPa.

$$\text{MOR (MPa)} = \left(\frac{3 Q L}{2 b h^2} \right) * 0,0980665 \quad (11)$$

Donde:

Q = carga máxima aplicada, en kg.

L = luz de ensayo, en cm.

b = ancho de la probeta, en cm.

h = altura de la probeta, en cm.

0,0980665 = Coeficiente de transformación a MPa.

Resistencia a la tensión y porcentaje de falla de la línea de cola en la madera.

Para este método de ensayo se prepararon, acondicionaron y ensayaron 30 probetas para cada especie de acuerdo a la norma europea UNE EN-205 (AENOR, 2003). Cada probeta consistió en la unión de dos piezas con dimensiones de 2 cm de ancho por 15 cm de largo y 0,75 cm de espesor mediante un adhesivo tipo Vynil acetato marca Lanco® Grip Bond 4™. Cada probeta presento un área de esfuerzo de 2 cm². Las probetas fueron ensayadas en una máquina para ensayos de tracción,

sujetando los extremos de las probetas en las mordazas de la máquina con una separación entre las mismas de 4 a 5 cm y se cargó la probeta hasta rotura. Para calcular la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas solapadas a un CH= 12%, se utilizó la ecuación 12. Además, se estimó el porcentaje de falla visualmente de acuerdo a la norma ASTM D 5266-99 (2005b).

$$T \text{ (MPa)} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{l_2 * b} \quad (12)$$

Donde:

T = Resistencia a la tensión en (MPa).

F_{max} = Fuerza máxima aplicada en Newton (N).

A = Superficie de ensayo pegada en (mm²).

l₂ = Longitud de la superficie de ensayo pegada (mm).

b = anchura de la superficie de ensayo pegada (mm).

Ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural

Para realizar este ensayo se fabricaron muestras de 2 cm x 2 cm x 2 cm a partir de la madera termotratada para la especie de *G. arborea* y por tipo de madera (albura y duramen) para la especie *T. grandis*, además de muestras sin termotratamiento. En este caso no se tomaron en cuenta los tipos de corte en la madera, ya que las dimensiones de las muestras utilizadas no permitieron definir la orientación según los tipos de corte. El ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural se llevó a cabo siguiendo la metodología de la norma ASTM designación D-2017-81 (ASTM, 2003). Esta consistió en secar las muestras en un horno durante 24 horas a 100°C y luego se determinó su masa anhidra. Seguidamente, las muestras fueron hidratadas durante 24 horas en un recipiente con agua, luego de esto se esterilizaron en una autoclave a 115°C durante dos horas. Posteriormente, estas fueron colocadas en frascos con tierra previamente inoculados con hongos de pudrición (dos muestras por frasco fueron colocadas). En este caso se utilizaron dos especies de hongos *Trametes versicolor* y *Lenzites Acuta*, 360 muestras por cada tipo de hongo. Las muestras permanecieron en contacto con el hongo durante 16 semanas. Transcurrido este tiempo se retiró el hongo adherido a las muestras y nuevamente se secaron durante 24 horas a 100°C para obtener la masa después de estar en contacto con el hongo. Finalmente se calculó la pérdida de masa con la ecuación 13.

$$Pp \text{ (\%)} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (13)$$

Donde:

P_p (%) = Porcentaje de pérdida de masa debido al ataque.

P_1 = Masa anhidra inicial del bloque (gramos).

P_2 = Masa anhidra del bloque después del ataque (gramos).

El grado de resistencia al ataque de los hongos se determinó de acuerdo a la clasificación propuesta por la norma ASTM (2003), (Cuadro 2).

Cuadro 2. Criterio de clasificación de la resistencia natural de la madera al ataque de los hongos de prueba en laboratorio (ASTM, 2003).

Promedio de pérdida de masa (%)	Grado de resistencia al hongo de prueba	Clase de resistencia
0 a 10	Altamente resistente	A
11 a 24	Resistente	B
25 a 44	Moderadamente resistente	C
45 o más	Ligeramente resistente a no resistente	D

Análisis Estadístico

Para cada una de las propiedades evaluadas en la madera termotratada de *T. grandis* y *G. arborea* se estimó la media y la desviación estándar de los datos, con el fin de establecer si la especie presenta estabilidad en la propiedad evaluada. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), para ello fueron verificados los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los datos. Los datos que no cumplieron con los puestos de normalidad o homocedasticidad, fueron transformados a través de la función “estandarizar” proporcionadas en el programa estadístico InfoStat el cual permitió el cumplimiento de los mismos. El análisis de varianza de las propiedades de la madera fue establecido en base al modelo detallado en la ecuación 14 para *G. arborea* y ecuación 15 para *T. grandis* (en este caso el factor bloque corresponde al patrón de corte “tangencial o radial” y cada uno fue analizado por separado). Se utilizó el programa estadístico Infostat para realizar el análisis estadístico de los datos. La existencia de diferencias significativas entre las medias de los tratamientos fue verificada mediante una prueba de Tukey, con una significancia estadística de $p < 0,05$.

$$y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (14)$$

$$y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + Bloque_k + \epsilon_{ijkl} \quad (15)$$

Donde μ es la constante que representa el promedio global, A_i es el efecto verdadero del i -ésimo nivel del factor A, B_j es el efecto verdadero del j -ésimo nivel del factor B, $(AB)_{ij}$ es el efecto verdadero de la interacción del i -ésimo nivel del factor A con el j -ésimo nivel del factor B..... y ϵ_{ij} , es el error experimental asociado con la k -ésima unidad experimental sujeta a la ij -ésima combinación de tratamiento. Se supone que μ es una constante y que las variables aleatorias ϵ_{ij} , están distribuidas normal independiente con media cero y varianza constante σ^2 .

Resultados

Determinación de densidad, contracción, pérdida de masa y absorción de humedad en madera termotratada.

La variación de la densidad y contracción para los diferentes tratamientos de acuerdo al tipo de madera (albura o duramen) y tipo de corte (radial o tangencial) se presenta en el cuadro 3. Donde se pudo observar que la densidad de la madera disminuyó con el aumento de la temperatura del termotratamiento en ambas especies, a excepción de la madera termotratada a 210 °C y 220 °C en duramen con corte radial y madera termotratada a 220° C de duramen con corte tangencial en *T. grandis*, donde se observó un aumento de la densidad en relación a las temperaturas de termotratamiento más bajas.

En relación a la contracción de la madera luego del termotratamiento, se obtuvo que la especie *T. grandis* es estadísticamente similar entre las diferentes temperaturas de termotratamiento utilizadas para los dos tipos de madera y los dos patrones de corte., No obstante, en la madera de *G. arborea* es estadísticamente diferente en ciertas temperaturas de termotratamiento. El rango de los valores obtenidos en porcentaje de contracción presentaron una variación de entre 1,20 y 2,61 % en *T. grandis* y entre 1,62 y 2,40% en *G. arborea*. Del mismo modo, se pudo observar que los valores de porcentaje de contracción obtenidos en los diferentes tratamientos para *T. grandis*, no presentaron un comportamiento específico, por el contrario, los valores en porcentaje de contracción obtenidos para la *G. arborea* tendieron a aumentar conforme aumentó la temperatura de termotratamiento, a excepción de la madera con corte tangencial termotratada a una temperatura de 200 °C que presentó una disminución en la contracción.

Cuadro 3. Densidad, y porcentaje de contracción para muestras de *T. grandis* y *G. arborea* según tipo de madera y tipo corte sometidas a 4 temperaturas de termotratamiento.

Especie	Tipo de madera	Tipo de corte	Temperatura de termotratamiento	Densidad (g cm ⁻³)	Contracción (%)
<i>Tectona grandis</i>	Albura	Tangencial	Testigo	0,59 (0,05) A*	-----
			205° C	0,57 (0,05) AB	2,21 (0,60) A
			210° C	0,54 (0,04) BC	1,75 (0,64) A
			215° C	0,53 (0,04) C	1,58 (0,80) A
			220° C	0,53 (0,4) C	2,07 (0,57) A

	Duramen	Radial	Testigo	0,56 (0,06) A	-----
			205° C	0,50 (0,05) B	1,20 (0,11) A
			210° C	0,52 (0,05) B	2,09 (0,12) A
			215° C	0,49 (0,04) B	2,24 (0,42) A
			220° C	0,50 (0,05) B	1,90 (0,54) A
		Tangencial	Testigo	0,60 (0,05) A	-----
			205° C	0,55 (0,05) B	1,71 (0,70) A
			210° C	0,55 (0,05) B	2,16 (0,94) A
			215° C	0,54 (0,05) B	1,94 (0,66) A
			220° C	0,55 (0,05) B	2,61 (0,79) A
<i>Gmelina arborea</i>		Radial	Testigo	0,47 (0,03) A	-----
			185° C	0,45 (0,04) AB	1,62 (0,38) A
			190° C	0,44 (0,03) B	1,86 (0,43) A
			195° C	0,44 (0,02) B	2,20 (0,42) B
			200° C	0,44 (0,04) B	2,33 (0,44) B
		Tangencial	Testigo	0,46 (0,04) A	-----
			185° C	0,45 (0,04) AB	1,89 (0,60) A
			190° C	0,45 (0,04) AB	2,25 (0,43) AB
			195° C	0,45 (0,04) AB	2,40 (0,67) B
			200° C	0,43 (0,04) B	2,36 (0,74) B

*El valor entre paréntesis indica la desviación estándar y los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa entre las temperaturas de termotratamiento para un 95% de confianza.

El porcentaje de pérdida de masa en las muestras termotrataadas se muestra en la figura 2. En el caso de *G. arborea* (figura 2a), se observó que los datos presentaron un comportamiento similar en ambos tipos de corte, con una tendencia a aumentar conforme aumentó la temperatura de termotratamiento. Por otra parte, la *T. grandis* (figura 2b) presentó un comportamiento similar para los dos tipos de madera y los dos tipos de corte, en el cual se observó una disminución en el porcentaje de pérdida de masa al termotratar a temperaturas de 205 °C a 210 °C. Posteriormente ocurrió un aumento progresivo en los valores del porcentaje de pérdida de masa al termotratar a temperaturas de 210 °C a 220 °C, aumentando el porcentaje de pérdida de masa conforme aumentó la temperatura de termotratamiento.

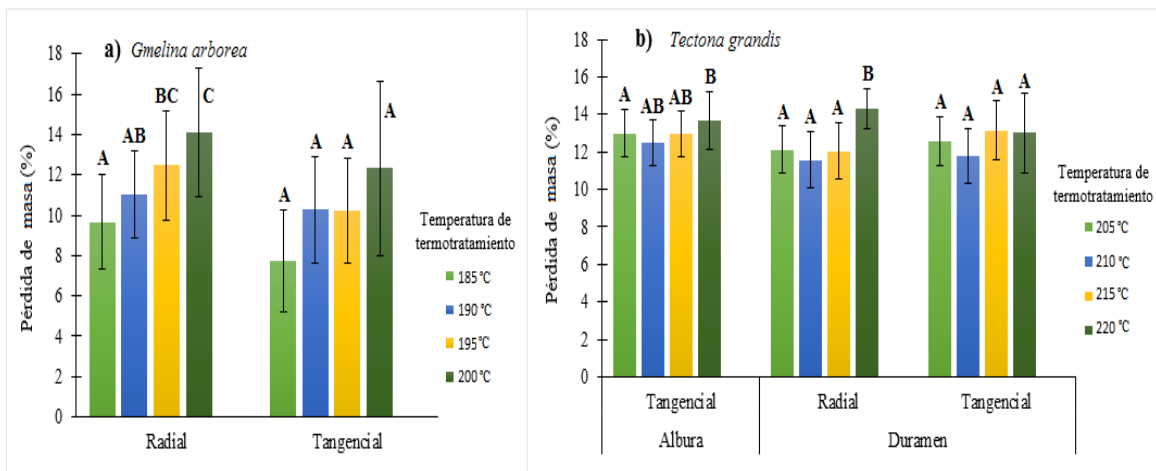


Figura 2. Pérdida de masa en madera termo-tratada a diferentes temperaturas a) *G. arborea* y b) *T. grandis*.

*Las barras de error indican la desviación estándar y los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa entre temperaturas de termotratamiento para un 95% de confianza.

Nota: En los datos de porcentaje de pérdida de masa para la especie de *G. arborea* con corte tangencial y para la madera de duramen con corte tangencial en la especie *T. grandis* fue necesario transformar los datos a través de la función estandarizar, debido a que no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

La variación del porcentaje de absorción para los diferentes tratamientos en la especie *G. arborea* y de acuerdo al tipo de madera (albura o duramen) en la especie *T. grandis* son presentados en la figura 3. En esta se puede observar que los valores de porcentaje de absorción para la *G. arborea* (figura 3a), presentaron un comportamiento irregular, donde la madera termotratada a una temperatura de 200 °C fue la que presentó el mayor porcentaje de absorción y la madera termotratada a una temperatura de 185 °C la que presentó el menor porcentaje de absorción. Del mismo modo, para la *T. grandis* (figura 3b), se pudo observar un comportamiento irregular de los valores entre los diferentes tratamientos para los tipos de madera (albura y duramen). No obstante, se logró apreciar que la madera de albura presentó valores de absorción mayores para todos los tratamientos en comparación a la madera de duramen, con valores que varían de 1,99 y 2,66 % para madera de albura y de entre 1,05 y 1,79% para madera de duramen.

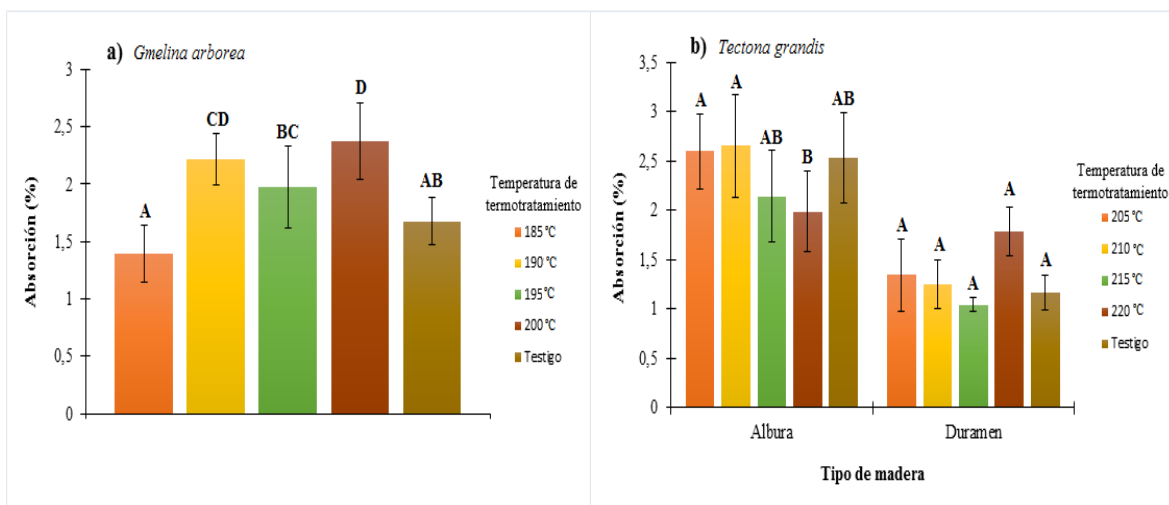


Figura 3. Porcentaje de absorción de humedad en madera termotratada a diferentes temperaturas a) *G. arborea* y b) *T. grandis*.

*Las barras de error indican la desviación estándar y los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa entre temperatura de termotratamiento para un 95% de confianza.

Determinación de los parámetros de color en madera termotratada.

El cambio en los parámetros de color en la superficie de la madera de *T. grandis* y *G. arborea* sometidas a un proceso de termotratamiento es mostrado en el cuadro 4. Se observó que en *T. grandis* los cambios en los parámetros evaluados presentaron diferentes comportamientos entre sí. Se obtuvo que los parámetros ΔL^* y Δb^* siguieron una tendencia en signo negativo en su totalidad (disminución de este valor). Para estos parámetros, la madera termotratada a una temperatura de 205 °C presentó los valores más altos en signo negativo para los diferentes tipos de madera y tipos de corte. Posteriormente, se obtuvo un aumento de los valores en signo negativo conforme aumentó la temperatura de termotratamiento (desde el tratamiento de 210 °C al de 220 °C), a excepción del valor en el parámetro Δb^* en madera de duramen con corte tangencial termotratada a una temperatura de 220 °C que sufrió una disminución. En el parámetro Δa^* se obtuvo que los valores presentados para los tipos de madera y tipos de corte siguen una misma tendencia, donde la madera termotratada a una temperatura de 205 °C reflejo los valores promedio más bajos, seguidos por un incremento en los tratamientos 210 °C y 215 °C respectivamente y una posterior disminución en los valores correspondientes al tratamiento de 220 °C.

En *G. arborea* se encontró que el parámetro ΔL^* presentó una tendencia negativa, donde los valores promedio más altos para ambos tipos de corte corresponden a la madera termotratada a 185 °C, ocurriendo una disminución del valor en la madera de termotratada a 190 °C, para luego tener un incremento en los valores en la madera termotratada a 210 °C a 220 °C. Los valores del parámetro Δa^* no presentaron un comportamiento específico en ninguno de los tipos de corte. Para el tipo de corte radial los valores más altos fueron obtenidos en la madera termotratada a 185 °C, luego ocurrió una disminución en la madera termotratada a 190 °C y finalmente aumentó el valor de Δa^* desde el tratamiento de 190 °C hasta 200 °C. En tanto, para el tipo de corte tangencial se obtuvo una disminución de los valores del parámetro Δa^* en la madera termotratada a 185 °C y 190 °C, seguido de un aumento en los valores en la madera termotratada a 195 °C y una posterior disminución en la madera de 200 °C. Finalmente, para el parámetro de Δb^* se obtuvieron valores con una tendencia negativa. En este caso, ambos tipos de corte (radial y tangencial) presentaron un aumento de los valores conforme aumentó la temperatura de termotratamiento.

Cuadro 4. Valores de cambio de color según parámetros (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) para muestras de *G. arborea* y *T. grandis* según tipo de madera y tipo corte sometidas a un proceso de termo tratamiento a 4 diferentes niveles de temperatura.

Especie	Tipo de madera	Tipo de corte	Temperatura de termotratamiento	Parámetros		
				ΔL*	Δa*	Δb*
<i>Tectona grandis</i>	Albura	Tangencial	205° C	-40,88 (3,00) A*	0,50 (1,27) A	-9,52 (2,93) A
			210° C	-32,96 (3,34) A	5,31 (1,17) B	-3,32 (3,61) A
			215° C	-35,33 (3,24) A	5,27 (1,49) B	-3,63 (3,93) A
			220° C	-40,63 (5,67) A	3,88 (1,20) C	-6,65 (4,20) A
	Duramen	Radial	205° C	-26,86 (3,22) A	-3,66 (1,81) A	-15,69 (3,21) A
			210° C	-21,40 (2,97) B	0,91 (1,94) B	-6,42 (3,34) B
			215° C	-25,97 (3,17) A	1,11 (1,45) B	-8,95 (2,97) C
			220° C	-26,44 (5,08) A	-0,67 (1,72) C	-11,83 (2,98) D
		Tangencial	205° C	-27,07 (3,67) A	-4,03 (2,01) A	-16,00 (2,79) A
			210° C	-19,48 (4,34) B	1,12 (2,44) B	-8,16 (4,27) A
			215° C	-21,75 (3,07) B	1,20 (2,85) B	-9,71 (4,05) A
			220° C	-24,86 (3,61) A	-0,70 (2,67) C	-8,98 (4,72) A
<i>Gmelina arborea</i>		Radial	185° C	-24,48 (5,14) AB	5,81 (1,31) A	-0,21 (4,80) A
			190° C	-24,00 (5,42) A	5,44 (1,11) A	-1,67 (3,88) A
			195° C	-26,74 (4,78) AB	5,95 (1,08) A	-2,08 (2,71) A
			200° C	-27,72 (4,91) B	5,95 (1,25) A	-2,56 (4,12) A

		185° C	-27,74 (4,59) A	5,97 (1,58) A	-2,54 (4,31) A
	Tangencial	190° C	-26,10 (4,53) A	5,23 (1,42) A	-2,21 (4,66) A
		195° C	-27,77 (5,45) A	5,83 (1,37) A	-2,84 (4,82) A
		200° C	-29,08 (5,15) A	5,76 (1,92) A	-3,55 (4,73) A

*El valor entre paréntesis indica la desviación estándar y los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa entre las temperaturas de termotratamiento para un 95% de confianza.

Nota: En el caso de los parámetros de Δa^* de *G. arborea* con corte tangencial y ΔL^* y Δb^* , de albura con corte tangencial y Δb^* de duramen con corte tangencial en la *T. grandis*, los datos fueron transformadas a través de la función estandarizar, debido a que no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Determinación del cambio total de color (ΔE^*) en madera termotratada.

Los resultados obtenidos en la medición del cambio total de color (ΔE^*) son mostrados en la Figura 4. En esta, se pudo observar que para *G. arborea* (figura 4a), el comportamiento de los valores de ΔE^* es similar en ambos tipos de corte, con una disminución de ΔE^* de la madera termotratada de 185 °C a 190 °C. Posteriormente se dio un aumento del ΔE^* conforme aumentó de la temperatura del termotratamiento. En tanto que en *T. grandis* (figura 4b), nuevamente se presentó un comportamiento similar entre los diferentes tipos de madera y tipos de corte. La madera termotratada a una temperatura de 205 °C presentó los valores de ΔE^* más altos. Además, se obtuvo una disminución de 205 °C a 210 °C, y posteriormente un aumento del ΔE^* con el aumento de la temperatura de termotratamiento (de 210 a 220 °C), (Figura 4b).

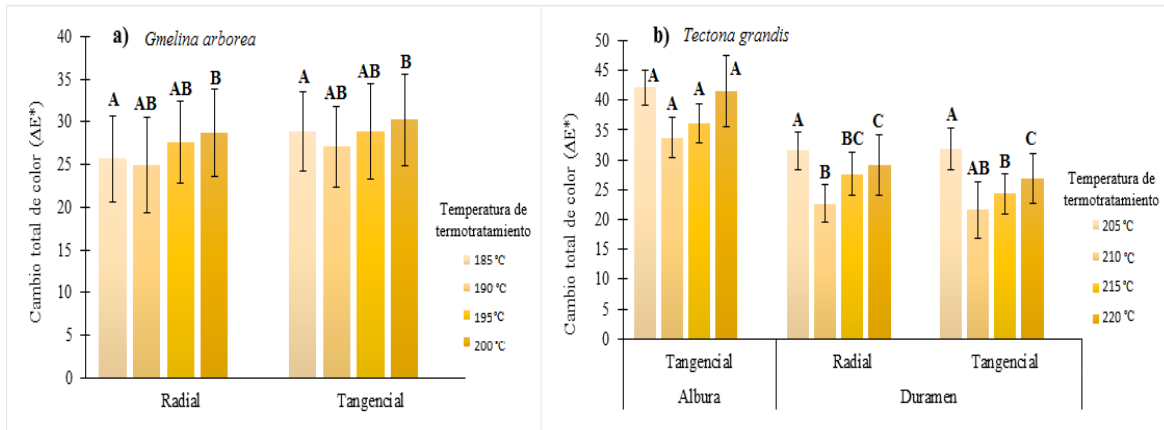


Figura 4. Cambio total de color en madera termotratada a diferentes temperaturas en las especies a) *G. arborea* y b) *T. grandis*.

*Las barras de error indican la desviación estándar y los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa entre las temperaturas de termotratamiento para un 95% de confianza.

Nota: Los datos de cambio total de color en madera de albura con corte tangencial de *T. grandis*, fueron transformadas a través de la función estandarizar, debido a que no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Determinación del módulo de elasticidad y módulo de ruptura en flexión estática en madera termotratada.

Las propiedades mecánicas evaluadas en la madera termotratada son presentadas en la figura 5. Se encontró que el módulo de elasticidad (MOE) en flexión en *G. arborea* presentó una tendencia irregular y similar entre ambos tipos de corte (figura 5a). Esta propiedad aumentó continuamente desde el tratamiento testigo hasta la madera termotratada a 190 °C, posteriormente una disminución en la madera termotratada a 190 °C y 195 °C, luego aumentó en la madera tratada a 195 °C y 200 °C (Figura 5a). Los valores de MOE en flexión en *T. grandis* (figura 5b) presentaron un comportamiento irregular entre las diferentes temperaturas, siendo la madera de albura tangencial y duramen radial las que presentaron valores de MOE más altos, excepto en la madera termotratada a 205 °C. A su vez, se obtuvo que el tratamiento a 210 °C presentó los valores más altos en MOE para la madera de albura tangencial y madera de duramen con corte radial. En caso de madera de duramen con corte tangencial los valores de MOE más altos fueron obtenidos en el tratamiento a 205 °C (Figura 5b).

Los resultados obtenidos en módulo de ruptura (MOR) en flexión estática muestran que la variación de los datos en *G. arborea* (figura 5c) fue irregular entre las diferentes temperaturas de termotratamiento en ambos tipos de corte (radial y tangencial). En estos, se pudo observar que los valores de MOR presentaron un comportamiento de aumento y disminución conforme cambiaron las temperaturas de termotratamiento establecidas, es decir, una disminución en los valores de la madera termotratada a 185 °C en relación a la madera sin termotratar, un aumento en los valores de la madera termotratada de 190 °C en relación a la madera termotratada a 185 °C, seguidos de una disminución y un aumento de los valores MOR en madera termotratada a 195 °C y 200 °C respectivamente (Figura 5c), a excepción del tratamiento a 195 °C para el tipo de corte tangencial, el cual presentó valores similares al tratamiento de 190 °C sin mostrar mucha variación. En la madera de *T. grandis* (figura 5d), fue encontrado que el MOR presentó un comportamiento similar entre los diferentes tipos de madera y tipos de corte, siendo los valores de la madera de duramen con corte tangencial los que presentaron la menor variación entre los diferentes tratamientos aplicados. Del mismo modo, se observó una disminución del MOR entre los valores de la madera sin termotratar en relación a los valores obtenidos de las muestras donde se aplicó el termotratamiento (Figura 5d).

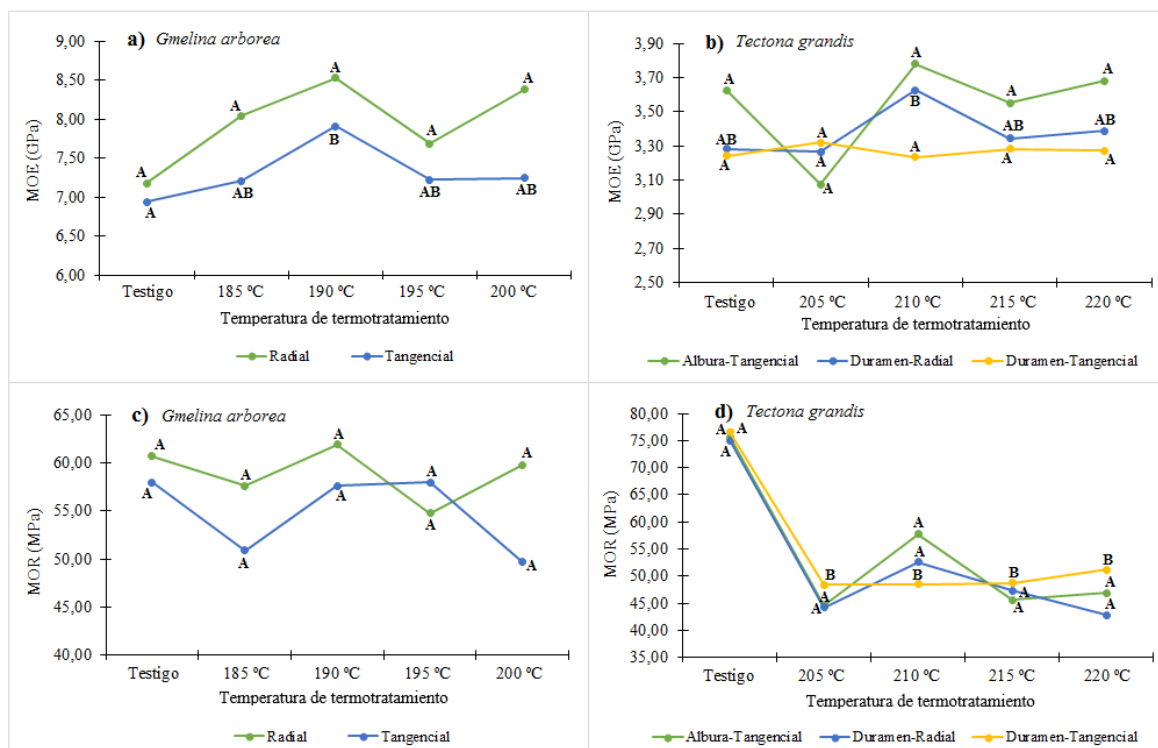


Figura 5. Módulo de elasticidad y módulo de ruptura en madera termotratada a diferentes niveles de temperaturas a) MOE en *G. arborea*, b) MOE en *T. grandis*, c) MOR en *G. arborea* y d) MOR en *T. grandis*.

*Los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa entre las temperaturas de termotratamiento para un 95% de confianza.

Nota: Los datos de MOE en *G. arborea* con corte radial, la madera de albura con corte tangencial en la *T. grandis*, el MOR para ambos tipos de corte en madera de *G. arborea* y la madera de albura con corte tangencial y el duramen con corte radial en la especie de *T. grandis*, fueron transformadas a través de la función estandarizar, debido a que no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Determinación de la resistencia en tensión y porcentaje de falla de la línea de cola en madera termotratada.

La variación de la resistencia en tensión y el porcentaje de falla de la línea de cola para los diferentes tipos de madera (albura o duramen) y tipos de corte (radial o tangencial) en madera termotratada de las especies en estudio son presentados en el cuadro 5. En este se observa que los valores de resistencia a la tensión presentaron una tendencia a disminuir conforme aumentó la temperatura de termotratamiento, a excepción de la madera de albura con corte tangencial termotrata a 215 °C, que presentó un aumento de la resistencia a la tensión en relación a la madera termotratada a 210 °C. A mismo, se observó que la madera sin termotratamiento presentó los valores mayores de resistencia a la tensión para cada uno de los tipos de madera y tipos de corte en ambas especies. En el parámetro de porcentaje de falla de la línea de cola igualmente no presentaron ningún comportamiento específico en los tipos de madera y tipo de corte en las especies, a excepción de la madera de duramen con corte tangencial de *T. grandis*, la cual presentó una tendencia de disminuir el porcentaje de falla con el aumento de la temperatura de termotratamiento.

Cuadro 5. Resistencia en tensión y porcentaje de falla para muestras de *G. arborea* y *T. grandis* según tipo de madera y tipo corte sometidas a un proceso de termotratamiento a 4 diferentes niveles de temperatura.

Especie	Tipo de madera	Tipo de corte	Temperatura de termotratamiento	Resistencia (MPa)	% de falla en madera
<i>Tectona grandis</i>	Albura	Tangencial	Testigo	11,52 (2,58) A*	69,33 (32,27) A
			205° C	4,84 (1,36) A	72,61 (31,28) A
			210° C	4,24 (1,97) A	60,94 (36,12) AB
			215° C	5,45 (1,66) A	41,33 (31,68) BC
			220° C	3,13 (1,52) A	26,39 (36,90) C

	Duramen	Radial	Testigo	9,40 (2,50) A	81,89 (25,18) A
			205° C	3,10 (1,56) A	77,78 (35,70) A
			210° C	2,85 (1,25) A	61,78 (37,58) A
			215° C	2,46 (1,12) A	43,78 (41,09) A
			220° C	2,58 (0,94) A	63,72 (35,62) A
		Tangencial	Testigo	11,52 (3,37) A	55,06 (34,45) A
			205° C	5,54 (2,49) A	51,50 (44,52) A
			210° C	4,54 (1,81) A	48,06 (41,05) A
			215° C	4,07 (1,74) A	46,33 (39,06) A
			220° C	3,34 (1,58) A	18,83 (23,91) A
<i>Gmelina arborea</i>		Radial	Testigo	8,01 (1,97) A	84,39 (21,03) A
			185° C	4,50 (1,54) A	53,17 (37,97) A
			190° C	4,95 (2,02) A	70,17 (37,61) A
			195° C	4,28 (1,44) A	75,33 (33,76) A
			200° C	4,13 (1,07) A	80,81 (30,21) A
		Tangencial	Testigo	8,69 (1,88) A	57,33 (31,43) A
			185° C	6,35 (1,33) A	64,56 (33,06) AB
			190° C	5,34 (1,84) A	81,89 (24,20) B
			195° C	5,75 (1,60) A	60,83 (33,71) AB
			200° C	5,28 (2,36) A	78,94 (31,00) AB

*El valor entre paréntesis indica la desviación estándar y los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa entre las temperaturas de termotratamiento para un 95% de confianza.

Nota: Los datos de resistencia a la tensión en las especies de *T. grandis* y *G. arborea* para los diferentes tipos de madera y tipos de corte, así como para el porcentaje de falla en madera de melina con corte radial y madera de duramen con corte radial y con corte tangencial para la especie de teca, fueron transformados a través de la función estandarizar, debido a que no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Determinación de la durabilidad en pruebas aceleradas de laboratorio en madera termotratada.

La durabilidad mediante pruebas aceleradas de laboratorio en madera termotratada a diferentes niveles de temperatura en *G. arborea* y *T. grandis* (por tipo de madera) son presentados en el cuadro 6. Los valores de pérdida de masa fueron muy irregulares para los dos tipos de hongos utilizados en el ensayo y las diferentes temperaturas de termotratamiento. La madera sin termotratar

(tratamiento testigo) de *T. grandis* presentaron los valores estadísticamente más altos en la pérdida de masa para ambos tipos de madera (albura y duramen) y en los dos tipos de hongos. En tanto los valores menores de pérdida de masa en *T. grandis* para madera de albura fueron obtenidos en la madera termotratada a 205 °C con el hongo *L. acuta* y a 220 °C para el hongo *T. versicolor*, pero en la madera de duramen, la menor pérdida de masa fue obtenida en la madera termotratada a 210 °C para ambos tipos de hongos. Para la *G. arborea* los valores mayores de pérdida de masa fueron presentados en la madera termotratada a 200 °C y 190 °C para los hongos *L. acuta* y *T. versicolor* respectivamente y los valores menores correspondieron a madera termotratada a 190° C y 195° C para los *L. acuta* y *T. versicolor* respectivamente.

Cuadro 6. Porcentaje de pérdida de masa por ataque de dos tipos de hongos en muestras de *G. arborea* y *T. grandis* según tipo de madera sometidas a un proceso de termotratamiento a 4 diferentes niveles de temperatura.

Especie	Tipo de madera	Temperatura de termotratamiento	Pérdida de masa en (%)	
			<i>Lenzites acuta</i>	<i>Trametes versicolor</i>
<i>Tectona grandis</i>	Albura	Testigo	14,76 (11,70) A*	29,32 (20,65) A
		205° C	8,31 (8,09) A	12,14 (9,05) A
		210° C	13,20 (6,73) A	12,20 (8,24) A
		215° C	9,46 (6,55) A	6,82 (5,57) A
		220° C	13,55 (4,27) A	4,90 (3,45) A
	Duramen	Testigo	13,91 (10,61) A	6,33 (7,27) A
		205° C	10,83 (5,81) A	4,72 (5,28) A
		210° C	9,65 (7,89) A	1,97 (5,46) A
		215° C	12,60 (4,79) A	3,07 (1,70) A
		220° C	11,85 (7,87) A	4,53 (3,35) A
<i>Gmelina arborea</i>		Testigo	19,44 (14,09) A	17,76 (20,78) A
		185° C	19,48 (14,54) A	11,95 (15,55) A
		190° C	24,09 (15,63) A	6,65 (11,61) A
		195° C	19,05 (16,33) A	22,44 (20,76) A
		200° C	17,19 (11,09) A	7,82 (9,27) A

*El valor entre paréntesis indica la desviación estándar y los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa entre las temperaturas de tratamiento para un 95% de confianza.

Nota: Los datos de pérdida de masa en los dos tipos de hongos en las especies de *T. grandis* y *G. arborea* fueron transformados través de la función estandarizar, debido a que no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Determinación de FTIR en la superficie de la madera termotratada.

La variación en la relación de intensidad (RI) en las diferentes señales asociadas a diferentes componentes químicos para las diferentes temperaturas de termotratamiento en los dos tipos de madera (albura o duramen) y tipos de cortes (radial o tangencial) para *T. grandis* se presenta en la figura 6. En esta se pudo observar que el comportamiento para la madera de duramen con corte radial (figura 6a, 6b, 6c) y tangencial (figura 6d, 6e, 6f) y la madera de albura con corte tangencial (figura 6g, 6h, 6i) presentaron tres rangos de valores: valores de RI máximos de entre 1,22 y 0,41, RI entre 0,37 y 0,14 y RI mínimos con valores entre 0,14 y 0,03.

Se observó que RI_{1053} y RI_{1108} , asociado al estiramiento de C-O y estiramiento de esqueleto aromático y C-O respectivamente, presentaron los valores más altos (Figura 6a, 6d, 6g). En estos dos RI de la madera termotratada de *T. grandis* de duramen-radial a 205, 210 y 220 °C presenta poca variación de RI, a excepción de la madera termotratada a 215 °C, donde presentó un aumento en RI_{1053} y una disminución en RI_{1108} (figura 6a). Para el caso de duramen termotratado con corte tangencial (figura 6d) se observó que el RI aumenta en la madera termotratada a 205 °C. Además, se observó una disminución del RI_{1108} al termotratar la madera a 215 °C (figura 6d). En tanto, para la madera termotratada de albura con corte tangencial se observó que el RI_{1053} disminuyó y el RI_{1108} aumentó levemente al termotratar a 220 °C (figura 6g).

En las señales de 1158, 1231 (C-H en plano de deformación por polisacáridos), 1419 (C-H en el plano de deformación), 1453 (deformación de C-H y vibración esquelética aromática), 1506, 1595 (vibración esquelética aromática), 1652 (carbonilo conjugado), y 1733 (estiramiento del grupo carbonilo C=O), (figura 6d, 6e, 6f), se observó que la mayor variación de los RI respecto a las temperaturas de termotratamiento ocurrió en la madera de duramen con corte tangencial (figura 6e), donde en su mayoría el tratamiento a 205 °C presentó los mayores valores de RI (Figura 6e). En tanto que en la madera de duramen de corte radial y albura de corte tangencial no ocurren variaciones considerables en el RI de las bandas de 1158, 1231, 1419, 1453, 1506, 1595, 1652, y 1733 cm^{-1} en la madera termotratada y la madera sin termotratar (Figura 6d,6h)

Por su parte, los valores de RI de los rangos mínimos correspondientes a las señales a 810, 895, 1273, 1318, 1330 y 1373 cm^{-1} asociados a la presencia de C-H en el plano de deformación por polisacáridos, mostraron que la mayor variación del RI en la madera de duramen con corte tangencial, donde se presentó un aumento en el RI cuando se termotrato la madera a 205 °C (figura 6f), Para la madera de duramen-radial y albura-tangencial (figura 6c, 6i) se observó muy poca variación de los RI en la madera de las diferentes temperaturas de termotratamiento, siendo los RI_{810} y RI_{1373} los que disminuyeron en la madera termotrata de duramen-radial en relación con la madera sin termotratar (figura 6c).

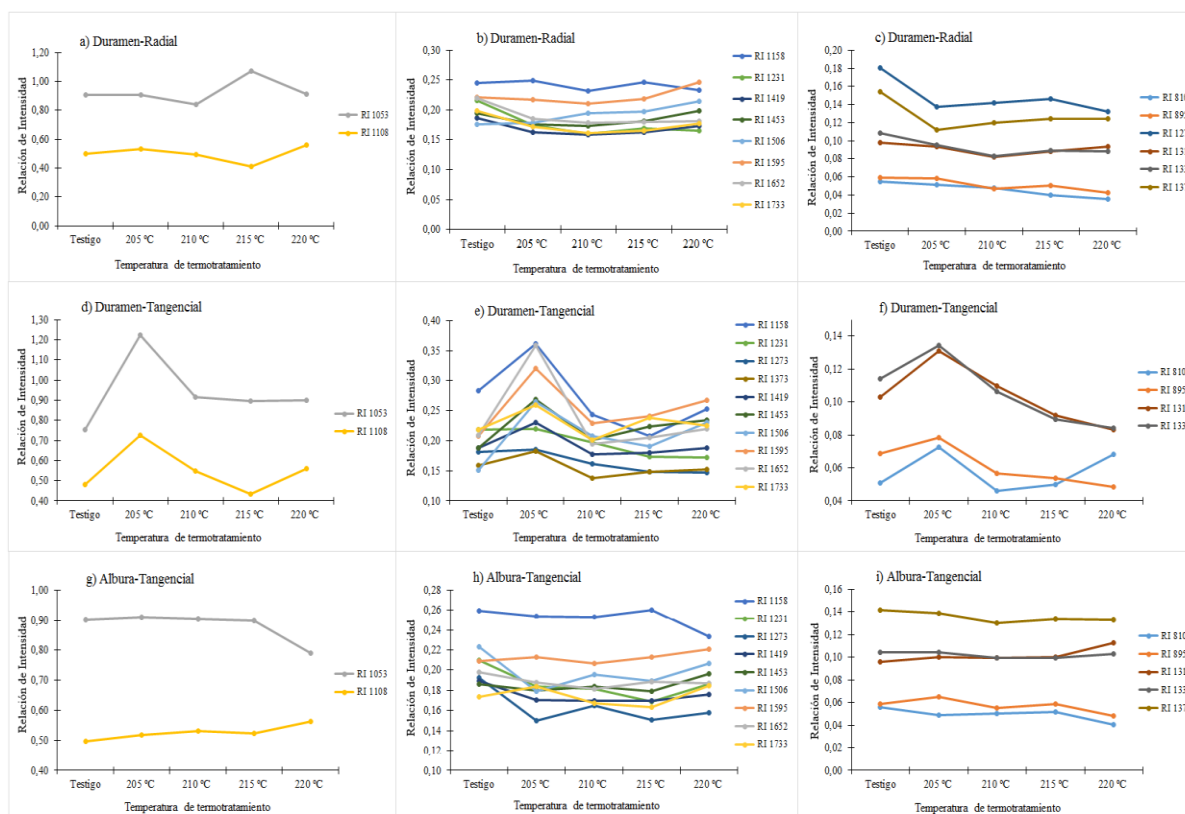


Figura 6. Cambios en la relación de intensidad de las bandas ($\text{In}/\text{T}_{1031}$) en diferentes temperaturas de termotratamiento para tipos de madera y tipos de corte en madera de *T. grandis*.

La variación en la relación de intensidad (RI) en las diferentes señales asociadas a diferentes componentes químicos para las diferentes temperaturas de termotratamiento de acuerdo al tipo de tipo de corte (radial o tangencial) para la especie *G. arborea* se presenta en la figura 7. En esta se pudo observar que el comportamiento para la madera de corte radial (figura 7a, 7b) y de corte tangencial (figura 7c, 7d) presentaron dos comportamientos en los valores de RI en la región de 800 y 1800 cm^{-1} : RI con valores máximos de entre 0,94 y 0,52 y IR con valores medios, valores de 0,26 y 0,12. La señal a 895 cm^{-1} no se tomó en cuenta en este caso, debido a que presentó valores de

intensidad muy bajos de entre 0,06 y 0,07 mostrando poca variación entre las diferentes temperaturas de termotratamiento y la madera sin termotratar.

En el rango de RI máximos, se observó que RI₁₀₅₃ y RI₁₁₀₈, asociado al estiramiento de C-O y estiramiento de esqueleto aromático y C-O respectivamente, presentaron los valores más altos (Figura 7a, 7C). No obstante, no hay diferencias entre las diferentes temperaturas del termotratamiento, a excepción de un leve aumento del RI₁₁₀₈ al termotratar la madera a 200 °C en ambos tipos de corte.

En tanto, en el rango de valores de RI medios 1158, 1231, 1318, 1373 (C-H en plano de deformación por polisacáridos), 1419 (C-H en el plano de deformación), 1453 (deformación de C-H y vibración esquelética aromática), 1506, 1595 (vibración esquelética aromática), 1652 (carbonilo conjugado), y 1733 (estiramiento del grupo carbonilo C=O) se observa poca variación entre las diferentes temperaturas de termotratamiento (figura 7b, 7d). La señal del RI₁₅₉₅, asociada a la vibración esquelética aromática, en la madera de corte radial presentó más variación, aumentando su RI al termotratar a 185 y 200 °C (figura 7b). En tanto para el tipo de corte tangencial (figura 7d), la señal de RI₁₂₃, asociada a la presencia de C-H en plano de deformación por polisacáridos, mostró una disminución del RI en madera termotratada.

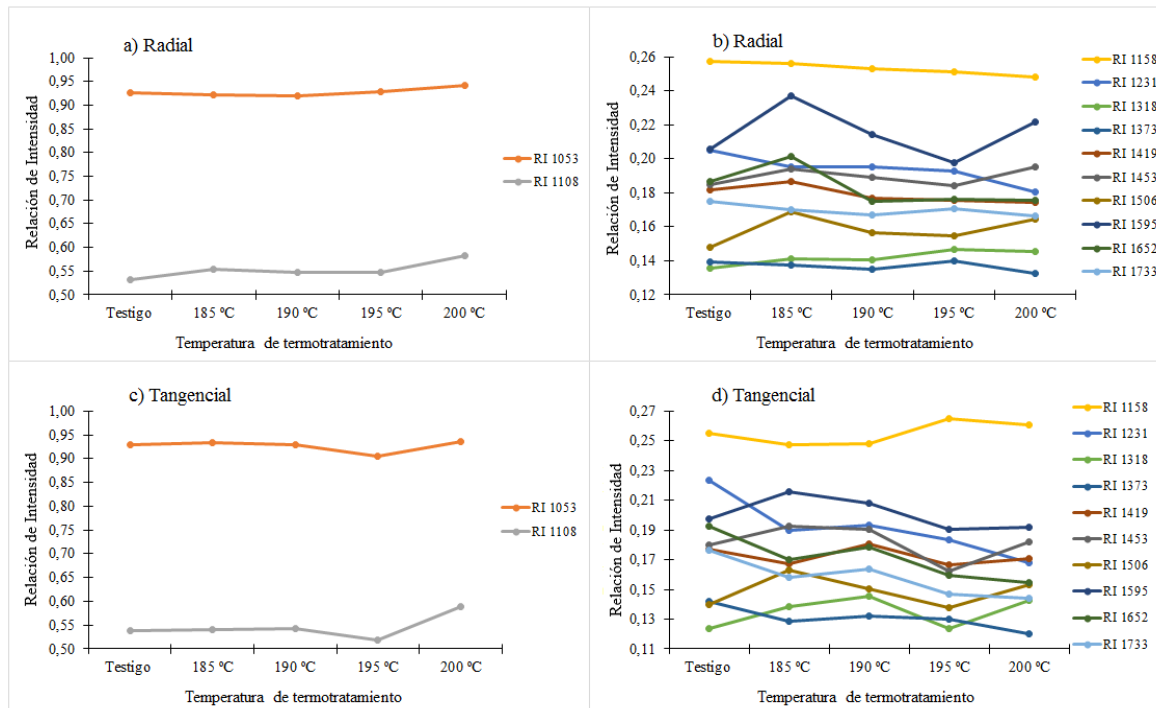


Figura 7. Cambios en la relación de intensidad de las bandas (In/T1031) en diferentes temperaturas de termotratamiento para los tipos de corte en madera de *G. arborea*.

Análisis de resultados

Determinación de densidad, contracción, pérdida de masa y absorción de humedad en madera termotratada.

La disminución de la densidad causada por el termotratamiento a diferentes temperaturas en los dos tipos de madera y tipos de corte de *T. grandis* y *G. arborea* (Cuadro 3) es congruente con lo reportado en madera termotratada de *Pinus sulvestris* (International Thermowood Association, 2003), de *Pyrus elaeagnifolia* (Gunduz et al., 2009), de *Fagus sylvatica* y *Picea abies* (Kuzman et al., 2015) y de *T. grandis* (Méndez-Mejías y Moya, 2016). Esta disminución de la densidad es asociada a pérdida de masa de la madera durante el tratamiento térmico (Kocaefe et al., 2008a y Awoyemi y Jones, 2011), como lo confirman los resultados obtenidos en la madera termotratada de *G. arborea* y *T. grandis* (Figura 2).

En relación con este parámetro fue observado que el porcentaje de pérdida de masa (%PM) en la madera aumentó con el aumento de la temperatura de termotratamiento (Figura 2), lo que es congruente con lo reportado en madera termotratada de *Tilia cordata* Mill. (Olarescu et al., 2014) y en madera termotratada de *Fagus orientalis* (Kookandeh et al., 2014). La pérdida de masa puede atribuirse a la degradación de componentes de la madera (principalmente hemicelulosas), producido por reacciones químicas durante el proceso de tratamiento térmico, lo que causa la volatilización de los extraíbles de la madera (Kocaefe et al., 2008b). Dicha degradación térmica provoca una pérdida de masa en la madera, que es uno de los indicadores más importantes de la calidad o el grado del tratamiento térmico aplicado (Kariz et al., 2013; Candelier et al., 2016b).

No en todos los casos ocurre un aumento el %PM con la temperatura de termotratamiento (Uribe y Ayala, 2015), por ejemplo, en este estudio en la madera termotratada de *G. arborea* con corte tangencial (figura 2a) y en *T. grandis* en la madera termotratada de duramen con corte tangencial (figura 2b) no hubo diferencias estadísticamente significativas por temperatura. En estos casos las temperaturas de termotratamiento no alcanzan producir cambios significativos en la pérdida de componentes y extractivos de la madera. Pero cuando hay un aumento de PM con la temperatura, por ejemplo, en la madera termotratada de *G. arborea* con corte radial (figura 2a) y en la madera de albura y duramen con corte tangencial y radial de *T. grandis* (figura 2b), son debido a que las altas temperaturas y los tiempos prolongados producen una reducción en masa (Gunduz et al., 2009).

La disminución de la densidad es uno de los principales indicadores del grado de tratamiento térmico (Kariz et al., 2013), obteniendo mayores pérdidas en la madera donde se termotrata a temperaturas más altas. No obstante, en este estudio no se encontraron diferencias significativas entre las temperaturas de termotratamiento en ambas especies, a excepción de la madera de albura con corte tangencial correspondiente a la temperatura de 205 °C, donde se obtuvo diferencias significativas respecto a las demás temperaturas de termotratamiento (Cuadro 3). Esta ligera diferencia entre las densidades de la madera termotratada en las diferentes temperaturas pueden ser explicadas por la afirmación de Uribe y Ayala (2015) y Gunduz et al. (2009), quienes indican que, aunque hay una disminución de masa en la madera y la disminución de volumen al termotratar no es altamente significativo como para provocar un cambio considerable en la densidad.

En relación con el porcentaje de contracción de la madera termotratada de las dos especies, tienen la ventaja que son valores menores a los indicados por la International Thermowood Association (2003), la cual indica parámetros de contracción para este tipo de madera de entre 5 y 8%, a diferencia del presente estudio que varían de 1,20 a 2,61 % (Cuadro 3).

En general y con pocas excepciones se encontró un aumento de la contracción con la temperatura de termotratamiento en las dos especies (Cuadro 3). Esto ocurre porque durante el termotratamiento la madera es sometida a temperaturas que causan una eliminación del agua presente en la pared celular de la madera (Straže et al., 2016), lo que provoca contracción de la madera. Por otro lado, es de esperar que altas contracciones sean obtenidas en madera termotratada a altas temperaturas y en la madera de corte tangencial, debido a que en ese sentido no interfieren las fuerzas de los radios por la orientación de las células del parénquima (Barnett y Bonham, 2004 y Priadi y Hiziroglu, 2013). Este comportamiento fue observado en la madera termotratada de *T. grandis*, donde los porcentajes de contracción mayores fueron obtenidos en madera de duramen con corte tangencial a una temperatura de 220 °C, pero en la madera de *G. arborea* la mayor contracción fue obtenida en madera con corte tangencial termotratada a una temperatura de 200 °C (Cuadro 3). Sin embargo, algunas incongruencias fueron encontrados en la madera termotratada, por ejemplo, la madera de duramen de *T. grandis* termotratada a 215 °C presentó una contracción mayor en dirección radial respecto a las contracciones en dirección tangencial de madera de albura y duramen (Cuadro 3). Este comportamiento puede ser atribuido a otros factores como lo es la presencia de madera juvenil (Zobel y Sprague, 2012), que presenta una alta contracción en sentido radial, o bien que las muestras fueron obtenidas de partes centrales de la troza que se caracteriza por una alta presencia de la madera juvenil.

La madera tratada térmicamente tiende a disminuir el porcentaje de absorción con el aumento de la temperatura de termotratamiento, debido a su mayor permeabilidad por los cambios químicos

provocados durante el proceso (Gunduz et al., 2009), como eliminación de volátiles y de compuestos orgánicos (Uribe y Ayala, 2015), principalmente agentes hidrófilos en la madera (Süleyman, 2012). Jämsä et al. (1999) indica que el tratamiento térmico reduce significativamente los esfuerzos radiales y tangenciales lo que provocan porcentajes de absorción menores, dichos cambios comienzan a ocurrir aproximadamente a partir de los 150 °C y se intensifican a medida en que se aumenta la temperatura. Sin embargo, dicho comportamiento no fue observado en el presente estudio. El porcentaje de absorción de agua en la madera termotratada aumentó en las diferentes temperaturas de termotratamiento para los tipos de corte en *G. arborea* (Figura 3a). En el caso de la madera termotratada de *T. grandis* (Figura 3b), ninguna temperatura de termotratamiento disminuyó la absorción de humedad tanto en la madera de albura como de duramen en relación a la madera sin termotratamiento.

La carencia del mejoramiento de la absorción de humedad por el termotratamiento en las dos especies de madera estudiada, puede ser atribuido a que estas maderas presentan baja absorción de humedad y buena estabilidad dimensional (Bailléres y Durand, 2000; Moreno y Roque, 2006 y Kokutse, et al., 2010). Por lo que el termotratamiento puede causar pocos efectos en los componentes afines a la humedad y por tanto pocos efectos en los porcentajes de absorción de humedad en la madera termotratada, como en el presente estudio.

Determinación de los parámetros de color y cambio de color total en madera termotratada.

Los valores obtenidos en el parámetro ΔL^* fueron negativos en su totalidad para ambas especies y diferentes tipos de corte y tipos de madera considerados (Cuadro 4), lo que significa que disminuye la luminosidad de la madera con el termotratamiento, mostrándose un oscurecimiento de la misma, coincidiendo (Ahajji et al., 2009). Otro aspecto importante de destacar es que la disminución de la claridad para ambas especies, presentó diferencias estadísticamente significativas del parámetro ΔL^* respecto a las temperaturas de termotratamiento aplicadas. No obstante, el cambio de color va depender de la presencia de albura o duramen en la madera termotratada (Méndez-Mejías y Moya, 2016). Esto fue comprobado en la madera termotratada de *T. grandis* (con una marcada diferencia entre albura y duramen) la disminución de la claridad se presenta en mayor grado en la madera termotratada de albura que en la madera termotratada de duramen. También otro factor que afecta en el cambio de color es el tipo de corte, el cual se encuentra relacionado con la facilidad de

lixiviación de algunos extractivos a la superficie de la madera (Boonstra y Tjeerdsma, 2006). En este estudio fue encontrado que la madera termotratada *G. arborea* y en la madera termotratada de *T. grandis* a altos niveles de temperaturas disminuyó la claridad en mayor grado en la madera termotratada de corte tangencial que en la madera de corte radial termotratada.

En tanto para el parámetro Δa^* , se encontró que la madera de *T. grandis* termotratada a 205 y 220 °C disminuye la tonalidad de rojiza, provocando a su vez tonalidades más verduzcas en ambos tipos de corte, presentando valores negativos de Δa^* o disminuciones en los valores positivos (cuadro 4), pero al termotratar a 210 y 215 °C, ocurre el efecto contrario, presentando valores de Δa^* positivos en su totalidad, por tanto, aumenta la coloración rojiza de la madera (Cuadro 4). En el caso de la madera *G. arborea* termotratada, el cambio del parámetro Δa^* no fue afectado estadísticamente por las temperaturas de termotratamiento (Cuadro 4), no obstante, tendió a aumentar conforme aumento el nivel de temperatura obteniendo tonalidades más rojizas en la madera, presentando valores de Δa^* positivos.

Por su parte, para el parámetro Δb^* se obtuvo que el termotratamiento disminuye la tonalidad amarilla en ambas especies de madera (*T. grandis* y *G. arborea*), debido a valores negativos de Δb^* . Así mismo, ninguna de las temperaturas de termotratamiento afecta significativamente este parámetro. Con la única excepción de la madera termotratada de duramen con corte radial en *T. grandis*, donde sí se obtuvieron diferencias significativas entre las temperaturas de termotratamiento, siendo la madera termotratada a 205 °C, la que produce los mayores cambios en disminución de la tonalidad amarilla (Cuadro 4). El aumento de la tonalidad rojiza y la disminución de la tonalidad amarilla en madera de *T. grandis* y *G. melina* es congruente con lo encontrado por Ahajji et al. (2009), al termotratar madera de *Picea abies* y *Fagus sylvestris*.

Otro aspecto importante de destacar en los resultados del cambio de color por el termotratamiento es que la madera con altas tonalidades de blanco (alto valores de L^*), bajo tonalidades de rojizas (bajos valores de a^*) y bajas tonalidades amarillas (bajos valores de b^*), tanto en la madera de *G. arborea*, como en la madera de albura de *T. grandis*, permiten apreciar mayores disminuciones de las tonalidad blanca y amarilla (alta disminución de ΔL^* y Δb^* , respectivamente) y aumentos de la tonalidad rojiza (aumento del Δa^*). Sin embargo, cuando la madera presenta un color oscuro antes del termotratamiento, baja tonalidad blanca (L^*) y amarillas (b^*), además de alta tonalidad rojiza (a^*), como en el caso de la madera de duramen en *T. grandis*, el termotratamiento

produce pocos cambios en las tonalidad blanca y amarilla (bajo valor de ΔL y Δb^*), pero una mayor tonalidad rojiza (aumento del Δa^*).

Con relación a los tipos de cortes, se obtuvo valores muy similares entre los diferentes parámetros de color (cuadro 4) en la madera de ambas especies. Si bien, el tipo de porosidad y el tipo de parénquima de la madera está relacionada con la orientación de corte y que este a su vez es afectado por el tratamiento térmico (Uribe y Ayala, 2015), en este estudio no se logró encontrar un cambio significativo entre el rango de valores obtenidos entre los tipos de corte y diferentes temperaturas de termotratamiento para las especies *G. arborea* y *T. grandis*. A diferencia del tipo de madera (albura y duramen) que como fue discutido si presentó cambios significativos. Resultado congruente con lo encontrado al termotratar madera de *Picea abies* y *Fagus sylvestris* (Ahajji et al., 2009).

Por otra parte, aunque existen cambios en los diferentes parámetros de color (ΔL^* , Δa^* y Δb^*), es necesario tener un cambio de color único, el cual es relacionado con los cambios que percibe el ojo humano (Aguilar-Tovar et al., 2009) del color de la madera luego del termotratamiento. Fue encontrado que independientemente de la especie o los tipos de corte en la madera, se presentó una tendencia de aumentar el ΔE^* (alto cambio de color perceptible al ojo humano) con el aumento la temperatura de termotratamiento, coincidiendo por lo reportado por la International Thermowood Association (2003) para madera termotratada de *Pinus sulvestris*. Así mismo, se obtuvo valores mayores de ΔE^* , en maderas de albura para *T. grandis* y *G. arborea* por ser maderas que presentan tonalidades más blancas y que al ser sometidas a proceso de tratamiento térmico presentan un cambio de color más notorio en comparación a madera de duramen donde es levemente menos apreciable. No obstante, en este tipo de madera blancas, el rango de temperatura utilizado tiene poco efecto ΔE^* ya que no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre algunas de las temperaturas de termotratamiento (figura 4).

Los cambios de color obtenidos después de aplicar el tratamiento térmico en la madera son causados principalmente por la hidrólisis de las hemicelulosas (Burtin et al., 2000; Bekhta y Niemz, 2003; Gunduz et al., 2009 y Chen et al., 2014) y que surgen gracias a la presencia de componentes esenciales de la madera como por ejemplo extractivos que contribuyen al cambio de color (Candelier et al., 2016b), y que a su vez provocan la disminución de la tonalidad blanca (disminución de L^*). Estos cambios son atribuidos a la degradación o modificación de componentes a través de reacciones como oxidación, deshidratación, descarboxilación e hidrólisis (Kocaefe et al., 2008b y Matsuo et al., 2010), así como el oscurecimiento de la lignina, lo cual se encuentra asociado a la generación de grupos cromóforos (González-Peña y Hale, 2009 y Salca et al., 2016), lo que provoca cambios de

color más notorios en maderas como *G. arborea* y la madera de albura en *T. grandis* debido a que presentan una tonalidad más clara.

A su vez Bourgois et al. (1989), menciona que la disminución en el contenido de hemicelulosas, especialmente pentosas, al termotratar madera entre el rango de 240-310 °C provoca una disminución en el ΔL^* y un aumento en el ΔE^* . Dichos cambios también se encuentran asociados a algunos grupos funcionales como carbonilo, estructuras de lignina, hemicelulosas o estructuras de quinoides relacionadas con la formación de sustancias causantes de la producción de color en madera termotratada (Yildiz et al., 2013 y Mitsui et al., 2003), correspondiente a las señales a 1506, 1419 y 1733 cm^{-1} asociados a grupos carbonilo (figura 6 y 7). Por su parte, Huang et al. (2012) y Chen et al. (2014) indican que la modificación de componentes de la madera como degradación de hemicelulosas y lignina, así como presencia de extraíbles residuales debido a la exposición de la madera a altas temperaturas, provoca cambios de color en ésta, siendo más apreciables conforme aumenta la temperatura de termotratamiento aplicada. La degradación térmica está directamente relacionada con el grado de oscurecimiento de las propiedades del color y de cada una de las diferencias de color parciales ΔL^* , Δa^* y Δb^* , así como el cambio total de color ΔE^* , las cuales dependen de las condiciones del tratamiento térmico aplicado (Salca et al., 2016), de ahí los cambios significativos en los parámetros del color (Cuadro 4) y consecuentemente los cambios de color visualmente apreciables (figura 8).

a) *Tectona grandis*



b) *Gmelina arborea*



Figura 8. Cambios de color en la madera de a) *Tectona grandis* y b) *Gmelina arborea*, de acuerdo a las diferentes temperaturas de termotratamiento definidas.

Determinación del módulo de elasticidad y módulo de ruptura en flexión estática en madera termotratada.

Por su parte, los valores de MOR obtenidos tanto para madera termotratada de *G. arborea* (figura 5c) como la de *T. grandis* (figura 5d), a pesar de que se aprecia una variación entre los valores a las diferentes temperaturas de termotratamiento, no se lograron establecer diferencias significativas entre las temperaturas para los diferentes tipos de madera y tipos de corte analizados (Figura 5). No obstante, en *T. grandis* (figura 5d), se obtuvo que los valores de MOR decayeron al aplicar tratamiento térmico, coincidiendo con la International Thermowood Association (2003) al termotratar madera de *Pinus sulvestris* que indica que las disminuciones de MOR y las pérdidas de resistencia más altas se presentan a temperaturas superiores a 220 °C, por lo que no se recomienda no utilizar la madera termotratada para usos estructurales. Por su parte, Hermoso et al. (2015) en *Pinus radiata* y Bekhta y Niemz (2003) en *Picea abies*, encontraron que el tratamiento térmico produce una pérdida del MOR, no obstante, el MOE no se ve afectado por el proceso de termotratamiento. El debilitamiento de las propiedades mecánicas surge por la modificación de la madera debido a la degradación química de polímeros (Candelier et al., 2016b). Según Awoyemi y Jones (2011), la reducción en valores de MOR se debe a la degradación de las paredes de la traqueida la cual a su vez coincide con la degradación de las hemicelulosas que es uno de los componentes principales de la pared celular. Además, por el aumento del contenido de celulosa cristalina y sustitución de enlaces flexibles hemicelulosa-celulosa-hemicelulosa con enlaces celulosa-celulosa más rígidos (Kocaefe et al., 2008b).

Otro aspecto importante de destacar de la madera termotratada es lo afirmado por Kim et al., (1998); Jiménez et al., (2011) y Bal (2014), quienes indican una disminución de la resistencia mecánica de la madera, la cual es mayor conforme aumenta la intensidad o temperatura de termotratamiento. No obstante, el tratamiento térmico no siempre disminuye en su totalidad las propiedades mecánicas de la madera, Kocaefe et al. (2010) encontró que tanto MOR y MOE presentaron un aumento hasta una temperatura de termotratamiento de 160 °C y luego ambos disminuyeron a medida que aumenta la temperatura. Por otra parte, Kubojima et al. (2000) y Jiang et al. (2014), al termotratar madera de *Picea sitchensis* y *Quercus mongolica* respectivamente encontraron que el MOE incremento en la etapa inicial y disminuyo después conforme aumento la temperatura, coincidiendo con lo obtenido en este estudio para la especie *G. arborea* (figura 5a).

Determinación de la resistencia en tensión y porcentaje de falla de la línea de cola en madera termotratada.

La resistencia a la tensión por tracción de juntas solapadas se muestra en el cuadro 5, en donde se puede apreciar que la resistencia disminuye conforme aumenta la temperatura de termotratamiento en ambas especies, independientemente del tipo de madera y tipo de corte definido. Sin embargo, a pesar de que existe esa disminución no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes temperaturas de termotratamiento. En tanto para el porcentaje de falla en madera obtenido luego de aplicado el ensayo se obtuvo que para *T. grandis*, presenta una disminución conforme aumenta la temperatura de termotratamiento, lo que indica que en madera termotratada a temperaturas más altas presento un mayor porcentaje de falla por la línea de adhesivo, no obstante, solo se presentaron diferencias significativas en la madera de albura con corte tangencial. Por otra parte, la madera de *G. arborea* mostro un comportamiento irregular en cuanto al porcentaje de falla de la madera; en este caso únicamente la madera con corte tangencial fue la que presento diferencias estadísticamente significativas.

Además, se puede observar que la madera termotratada de *G. arborea* presentó valores de resistencia levemente más altos que los de *T. grandis*, lo que se puede deber a que en la madera termotratada de *T. grandis* se utilizaron temperaturas de termotratamiento más elevadas, lo que ocasiona una mayor fragilidad de la madera (Yildiz et al., 2006). Por su parte, (Kuzman et al., 2015) indica un aumento en la resistencia de tensión en juntas encoladas de madera de *Fagus sylvatica* y *Picea abies* al termotratar a 190 °C, en comparación a muestras no termotratadas. No obstante, dichos autores no obtuvieron diferencias significativas en la resistencia de la junta encolada en madera termotratada a diferentes temperaturas, coincidiendo con lo obtenido en este estudio donde tampoco se presentaron diferencias estadísticamente significativas (Cuadro 5). La pérdida de resistencia o fuerza en estos casos ocurre principalmente por la degradación de las hemicelulosas, que son menos estables al calor que la celulosa y la lignina (Hill, 2006; Yildiz et al., 2006 y Kuzman et al., 2015).

En tanto para el porcentaje de falla en madera se presentó valores superiores a 50% en su mayoría independientemente el tipo de madera y tipos de corte en ambas especies (Cuadro 5), lo que se puede deber a una buena acción del adhesivo que resistió al aplicar una fuerza. De acuerdo a Ciannamea et al. (2012), un adhesivo para formar un enlace apropiado con el material necesita humedecer bien la superficie, fluir sobre la superficie y penetrar en el material sin perder la adhesividad entre las partículas. Por otro lado, Muñoz et al. (2011) indican que en la interacción entre adhesivo y sustrato también influyen las propiedades químicas de la especie, así como el contenido

de extractivos. Estos extractivos pueden presentar una migración hacia las capas superficiales de la madera, lo que provoca una inactivación superficial lo que impide el contacto entre los grupos activos hidróxilos OH de la madera y el adhesivo (Frihart y Hunt, 2010). Este fenómeno puede ser relacionado con este estudio, ya que al someter la madera a termotratamiento, surge una ruptura de enlaces OH y volatilización de extractivos lo que permitiría una mejor unión entre el adhesivo y el sustrato (Kocaefe et al., 2008b). No obstante, la International Thermowood Association (2003) menciona que la adhesión depende del tratamiento térmico, ya que el material al perder resistencia y ser más frágil por la temperatura aplicada, puede presentar altos porcentajes de falla en madera desde 90 a 100%, causando una separación de la línea de pegamento y no del adhesivo.

Determinación de la durabilidad en pruebas aceleradas de laboratorio en madera termotratada.

Las pérdidas de masa del ensayo acelerado de resistencia al ataque de hongos (Cuadro 6) catalogan la madera termotratada en las diferentes temperaturas y diferentes tipos de hongos entre “altamente resistente y resistente” ante los hongos *T. versicolor* y *L. acuta* acorde a norma ASTM 2017 (ASTM, 2003), debido a que los valores de pérdida de masa se encuentran entre 0 y 24%, a diferencia de la madera de albura sin termotratar para la especie *T. grandis* que presenta valores de pérdida de masa sobre 25% ante el hongo *T. versicolor* y que la cataloga como “moderadamente resistente” basados en los norma anteriormente mencionada. Un aspecto importante de mencionar es que la madera termotratada a diferentes temperaturas no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes temperaturas de termotratamiento y entre la madera sin termotratar (Cuadro 6). Coincidiendo con lo reportado por Kamdem et al. (2002), quién menciona que los porcentajes de pérdida de masa obtenidos para madera termotratada de *Fagus sylvatica*, *Pinus sp.* y *Picea abies* ante dos hongos de pudrición café (*Gloeophyllum trabeum* y *Poria placenta*) y uno de pudrición blanca (*Irpex lacteus*), no presentaron diferencias significativas entre las temperaturas de termotratamiento utilizadas (entre 200 y 206 °C). Así mismo, los resultados obtenidos en madera termotratada de *G. arborea* y *T. grandis* son congruentes con los de madera de *Fraxinus excelsior* termotratada a temperaturas de entre 170 y 228 °C, ante los hongos los de pudrición *Poria placenta* y *Coriolus versicolor* (Candelier et al., 2016a).

Según Venäläinen et al. (2014), la pérdida de masa provocada por los hongos se debe a la degradación de los polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) inicialmente y posteriormente por la degradación de la lignina en las etapas más avanzadas, esto para hongos de pudrición café, mientras

que los hongos de pudrición blanca inicialmente degradan la lignina y luego la celulosa; aspectos que se ven reflejados al aplicar tratamiento térmico. De acuerdo a Momohara et al. (2003) y Calonego et al. (2010), el aumento en la resistencia a la desintegración por el ataque de hongos está relacionado a la duración y la temperatura de termotratamiento, siendo más evidente en temperaturas y tiempos de exposición más altos. Esto se debe a que a temperaturas de termotratamiento más altas existe una mayor disminución de humedad, hemicelulosas, así como de componentes como lípidos, almidón y algunos ácidos grasos necesarios para el crecimiento de los hongos, limitando la capacidad de acción de los mismos (Kocaefe et al., 2010 y Hermoso et al., 2015).

Al comparar las dos especies de madera los resultados obtenidos en este estudio (cuadro 6), se puede observar que la especie *G. arborea*, presentó porcentajes de pérdida de masa por ataque superiores a los obtenidos en *T. grandis* en ambos tipos de hongo. Esta diferencia puede ser explicada por lo indicado por Mazela et al. (2004) y Paul et al. (2007), quienes mencionan un aumento poco significativo en la resistencia a la degradación fúngica al termotratar madera a temperaturas inferiores a 200 °C, lo cual fue aplicado en la madera de *G. arborea*. De hecho, autores como (Jämsä y Viitaniemi, 2001 y Welzbacher et al., 2007) recomiendan utilizar una temperatura mínima de termotratamiento de 220 °C, para lograr un aumento significativo en la resistencia a la degradación por hongos, aspectos que no fueron aplicados en este estudio y pudieron estar influyendo en los resultados obtenidos.

Determinación de FTIR en la superficie de la madera termotratada.

Dentro del rango de estudio entre 1800 y 800 cm^{-1} , se logró observar que independientemente del tipo de madera o tipo de corte definido para ambas especies (figura 6 y 7), los mayores valores de intensidad los presentaron las señales a 1053 y 1108 cm^{-1} , las cuales son asociadas a aumentos en las vibraciones de estiramiento en los anillos de glucosa (Lionetto et al., 2012) y modificación de celulosas y hemicelulosas (Yildiz et al., 2013), respectivamente. Entonces esas bandas son afectadas por el termotratamiento de la madera

Específicamente en la madera de duramen con corte tangencial termotratada de *T. grandis* (figura 6d, 6e, 6f) presentó los mayores cambios en las intensidades para las diferentes temperaturas de termotratamiento y madera no tratada, principalmente en las bandas 1158, 1373, 1453 cm^{-1} asociadas a la celulosa (Berrocal et al., 2016), en la banda de 1652 cm^{-1} , asociado a C=O conjugado en inquilinas junto con estiramiento de varios grupos de C=O, además de las bandas a 1595 y 1419

cm^{-1} asociados al estiramiento de $\text{C}=\text{C}$ de los componentes esqueléticos aromáticos en lignina y deformación de $\text{C}-\text{H}$ en lignina y carbohidratos respectivamente (Li et al., 2015 y Méndez-Mejías y Moya, 2016). La reducción de la intensidad en señales asociadas a la celulosa, indican cambios en la estructura de la celulosa o la formación de compuestos como alcoholes alifáticos (Li et al., 2015 y Berrocal et al., 2016) lo cual puede estar sucediendo por el tratamiento térmico aplicado.

En tanto la variación de la intensidad y el leve aumento en algunas de las temperaturas de termotratamiento en las bandas a 1506 cm^{-1} y 1453 cm^{-1} (Figura 6 y 7), asignados al grupo carboxilo ($\text{C}=\text{O}$) que pueden deberse al estiramiento de los componentes esqueléticos aromáticos en lignina y la banda a 1733 cm^{-1} , asignado a la vibración de estiramiento de carbonilo, carboxilo y grupos acetilo, relacionados a cambios en la estructura química de la hemicelulosa (Windeisen y Wegener, 2008; Chen et al., 2012 y Li et al., 2015).

Los cambios en las intensidades en las señales encontradas, evidencia que el tratamiento térmico afecta los componentes de la madera lo que a su vez repercute en algunas de sus propiedades tanto físicas como mecánicas, como por ejemplo la estabilidad dimensional debido a la reducción de grupos hidroxilos que son reemplazados por grupos acetilo hidrófobos resultantes de la reticulación entre las fibras de la madera por el tratamiento de calor aplicado (Yildiz et al., 2006 y Esteves et al., 2007).

Conclusiones

- El termotratamiento de la madera produce una tendencia a disminuir la densidad con el aumento de la temperatura del termotratamiento en ambas especies. No obstante, el porcentaje de contracción presentó un comportamiento irregular en relación a la temperatura. La madera de duramen con patrón de corte tangencial termotratada a 220°C en el *T. grandis* y la madera de *G. arborea* con patrón de corte tangencial termotratada a 195 °C mostraron los mayores porcentajes de contracción. El porcentaje de pérdida de masa aumentó con el aumento de la temperatura de termotratamiento en ambas especies, mientras que el porcentaje de absorción disminuyó para *T. grandis* y la madera termotratada de *G. arborea* presentó un comportamiento irregular de la absorción con el aumento de la temperatura del termotratamiento.
- El cambio de color total (ΔE^*) de la madera termotratada aumentó con el aumento la temperatura de termotratamiento. El cambio de color mostró los mayores cambios en el parámetro de luminosidad (ΔL^*), en tanto el enrojecimiento (Δa^*) y la amarillez (Δb^*) mostraron menores cambios de coloración, por lo tanto, las tonalidades más oscuras se obtuvieron al termotratar madera de *T. grandis* y *G. arborea* a temperaturas de 220 y 200 °C respectivamente. Los valores mayores de ΔE^* se obtuvieron en madera de albura para *T. grandis* y *G. arborea* al ser maderas de tonalidades más claras, presentando un cambio de color más notorio en comparación a madera de duramen, no obstante, no se obtuvieron diferencias significativas entre algunas de las temperaturas de termotratamiento.
- El MOR fue afectado mayormente en madera de duramen con corte radial de *T. grandis* y madera de *G. arborea* con corte tangencial termotratada a temperaturas de 220 y 200°C respectivamente. En tanto los valores más bajos de MOE se obtuvieron en madera de albura con corte tangencial termotratada a 205 °C para *T. grandis* y en la madera sin termotratar con corte tangencial para *G. arborea*.
- La resistencia a la tensión por línea de cola presentó una tendencia a disminuir con el aumento de la temperatura del termotratamiento en ambas especies. En tanto se encontró que el porcentaje de falla ocurrió mayormente en madera con valores superiores a 26%.

- La durabilidad de la madera, medido por el ensayo acelerado de hongos, se encontró que *L. acuta* degrado en mayor grado la madera en relación a *T. versicolor*. No obstante, aunque presentó un comportamiento irregular en relación a las temperaturas de termotratamiento en ambas especies, se logró apreciar una disminución de pérdida de masa por ataque en las temperaturas de termotratamiento más altas. Del mismo modo se obtuvo que la especie *G. arborea* es más susceptible a la degradación en comparación con *T. grandis*.
- La relación de intensidad en las bandas a 1652 y 1733 cm^{-1} asociadas a la afectación de hemicelulosas que fue el polímero estructural relacionado en mayor medida a la afectación de las propiedades evaluadas, mostraron variación en las diferentes temperaturas de termotratamiento independientemente de la especie, tipo de madera o tipo de corte, en relación a las diferentes temperaturas de termotratamiento, indicando modificación química con el termotratamiento.
- El termotratar madera de las especies *G. arborea* y *T. grandis* a temperaturas de 200 y 220 °C permite obtener las mejores condiciones para potencializar su uso, ya que mejora aspectos como apariencia, durabilidad, estabilidad dimensional, así como un material más ligero.

Recomendaciones

- De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se logró determinar que el tratamiento térmico tanto en *T. grandis* como en *G. arborea* influye sobre las propiedades de la madera favoreciendo unas y afectando otras, por lo que para lograr las mejores características del material se debe hacer un balance entre lo deseado y lo óptimo. No obstante, lo antes mencionado depende del objetivo por el cual se está termotratando la madera ya que, por ejemplo, si requiere madera con un color más relevante y una mayor durabilidad para usos donde se requiere poco esfuerzo se recomienda utilizar altas temperaturas de termotratamiento. Por el contrario, si se requiere material con mejores propiedades mecánicas se recomienda utilizar temperaturas de termotratamiento más bajas, tomando en cuenta que esto a su vez va a producir menores cambios de color, menor durabilidad, entre otros aspectos.

Referencias

- Aguilar-Tovar, D., Moya, R., y Tenorio, C. (2009). Wood color variation in undried and kiln-dried plantation-grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. *Maderas Ciencia y tecnología*, 11(3).
- Ahajji, A., Diouf, P. N., Aloui, F., Elbakali, I., Perrin, D., Merlin, A., y George, B. (2009). Influence of heat treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives. *Wood Science and Technology*, 43(1-2), 69-83.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2003). Standard method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods. *Annual Book of ASTM Standards*. Vol. 04.10., Philadelphia. USA. (ASTM D 2017-81 Reproved 1994).
- American Society for Testing Materials (ASTM). (2005a). Standard practice for calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates. *Book of Standards*. Pennsylvania, 224p. ASTM D-2244-02
- American Society for Testing Materials (ASTM). (2005b). Standard Practice for Estimating the Percentage of Wood Failure in Adhesive Bonded Joints. *Annual Book of Standards*. Philadelphia, USA, 1-4p. ASTM, D 5266-99.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2007). Standard test methods for small clear specimens of timber. *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia, 2007. 32 p. ASTM D-143-94
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). Standard test methods for small clear specimens of timber. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, USA. 04(10), 31 p. ASTM D143-14.
- Ansell, M. P. (2012). Wood: A 45th anniversary review of JMS papers. *Journal of Materials Science*, 47(2), 583-598.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2003). Adhesivos para madera de uso no estructural. Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas solapadas. Norma Europea, 15 p. UNE-EN 205.

- Awoyemi, L., y Jones, I. P. (2011). Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment. *Wood science and technology*, 45(2), 261-267.
- Baillères, H., y Durand, P. Y. (2000). Non-destructive techniques for wood quality assessment of plantation-grown teak. *Bois et Forêts des Tropiques*, (263), 17-29.
- Bakar, B. F. A., Hiziroglu, S., y Tahir, P. M. (2013). Properties of some thermally modified wood species. *Materials & Design*, 43, 348-355. doi:10.1016/j.matdes.2012.06.054
- Bal, B. C. (2014). Some physical and mechanical properties of thermally modified juvenile and mature black pine wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(1), 61-66.
- Baradit, E., Niemz, P. y Fernández, A. (2013). Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. *Maderas Ciencia y tecnología*, 15(2), 235-244.
- Barnett, J. R., y Bonham, V. A. (2004). Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological reviews*, 79(2), 461-472.
- Bekhta, P. y Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability, and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, 57(5), 539-546. doi: [10.1515/HF.2003.080](https://doi.org/10.1515/HF.2003.080)
- Berrocal, A., Moya, R., Rodriguez-Solis, M., Starbird, R., y Muñoz, F. (2016). Surface Chemical and Color Characterization of Juvenile *Tectona grandis* Wood Subjected to Steam-Drying Treatments. *Surface Review and Letters*, 23(01), 1550091.
- Bonifazi, G., Calienno, L., Capobianco, G., Monaco, A. L., Pelosi, C., Picchio, R., y Serranti, S. (2015). Modeling color and chemical changes on normal and red heart beech wood by reflectance spectrophotometry, Fourier Transform Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging. *Polymer Degradation and Stability*, 113, 10-21.
- Boonstra, M. J. y Tjeerdsma, B. (2006). Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(3), 204-211.
- Bourgois, J., Bartholin, M. C., y Guyonnet, R. (1989). Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product. *Wood Science and Technology*, 23(4), 303-310.

- Burtin, P., Jay-Allemand, C., Charpentier, J. P., y Janin, G. (2000). Modifications of hybrid walnut (*Juglans nigra* 23 x *Juglans regia*) wood colour and phenolic composition under various steaming conditions. *Holzforschung*, 54(1), 33-38.
- Calienno, L., Pelosi, C., Picchio, R., Agresti, G., Santamaria, U., Balletti, F., y Monaco, A. L. (2015). Light-induced color changes and chemical modification of treated and untreated chestnut wood surface. *Studies in Conservation*, 60(2), 131-139.
- Calonego, F. W., Severo, E. T. D., y Furtado, E. L. (2010). Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140 C, 160 C, 180 C, 200 C and 220 C. *Bioresource Technology*, 101(23), 9391-9394.
- Candelier, K., Hannouz, S., Thévenon, M-F., Guibal, D., Gérardin, P., Pétrissans, M., y Collet, R. (2016a). Resistance of thermally modified ash (*Fraxinus excelsior* L.) wood under steam pressure against rot fungi, soil-inhabiting micro-organisms and termites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 1-14.
- Candelier, K., Thevenon, M. F., Petrissans, A., Dumarcay, S., Gerardin, P., y Petrissans, M. (2016b). Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science*, 1-13.
- Ciannamea, E. M., Martucci, J. F., Stefani, P. M., y Ruseckaite, R. A. (2012). Bonding quality of chemically-modified soybean protein concentrate-based adhesives in particleboards from rice husks. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(9), 1733-1741.
- Chen, Y., Fan, Y., Gao, J., y Stark, N. M. (2012). The effect of heat treatment on the chemical and color change of black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood flour. *Bioresources*, 7(1), 1157-1170.
- Chen, Y., Tshabalala, M. A., Gao, J., Stark, N. M., y Fan, Y. (2014). Color and surface chemistry changes of extracted wood flour after heating at 120 C. *Wood science and technology*, 48(1), 137-150.
- Esteves, B., Marques, A. V., Domingos, I., y Pereira, H. (2007). Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood science and technology*, 41(3), 193-207.

- Esteves, B., Nunes, L., Domingos, I., y Pereira, H. (2014). Comparison between heat treated sapwood and heartwood from *Pinus pinaster*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(1), 53-60.
- Frihart, C. R., y Hunt, C. G. (2010). Adhesives with Wood Materials Bond Formation and Performance. Wood Handbook-Wood as an engineering material. Centennial Edition, Forest Products Laboratory. *US Department of Agriculture Forest Service, general technical report*, 508 p.
- González-Peña, M. M. y Hale, M. D. (2009). Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 1: Colour evolution and colour changes. *Holzforschung*, 63(4), 385-393.
- Gunduz, G., Aydemir, D. y Karakas, G. (2009). The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. *Materials & Design*, 30(10), 4391-4395.
- Hermoso, E., Fernández-Golfín, J., Conde, M., Troya, M. T., Mateo, R., y Cabrero, J. (2015). Characterization of thermally modified *Pinus radiata* timber. *Maderas Ciencia y Tecnologia*, 17(3), 493-504.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Febrianto, F., Lee, S. H., y Kim, N. H. (2016). Effect of Treatment Duration and Clamping on the Properties of Heat-Treated Okan Wood. *BioResources*, 11(4), 10070-10086.
- Hill, C. A. (2006). Thermal modification of wood. Wood modification: Chemical, thermal and other processes, 99-127.
- Holdridge, L. R. (1967). Life Zone Ecology. *Tropical Science Center*. San José, Costa Rica, 260 p.
- Huang, X., Kocaefe, D., Kocaefe, Y., Boluk, Y., y Pichette, A. (2012). A spectrophotometric and chemical study on color modification of heat-treated wood during artificial weathering. *Applied surface science*, 258(14), 5360-5369.
- International Thermowood Association. (2003). Thermowood handbook. Helsinki, Finland, 08-04.
- Jämsä, S., Ahola, P., y Viitaniemi, P. (1999). Performance of coated heat-treated wood. Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions, 82(6), 297-300.

- Jämsä, S., y Viitaniemi, P. (2001). Heat treatment of wood—Better durability without chemicals. In Proceedings of special seminar held in Antibes, France.
- Jiang, J., Lu, J., Zhou, Y., Huang, R., Zhao, Y., y Jiang, J. (2014). Optimization of processing variables during heat treatment of oak (*Quercus mongolica*) wood. *Wood science and technology*, 48(2), 253-267.
- Jiménez, J. P., Acda, M. N., Razal, R. A. y Madamba, P. S. (2011). Physico-Mechanical properties and durability of thermally modified malapapaya [*polyscias nodosa* (blume) seem.] wood. *Philipp J Sci*, 141(1), 13-23.
- Kamdern, D. P., Pizzi, A. y Jermannaud, A. (2002). Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 60(1), 1-6.
- Kariz, M., Kuzman, M. K. y Sernek M. (2013). The effect of heat-treatment on the withdrawal capacity of screws in Spruce wood. *BioResources* 8:4340–4348.
- Kesik, H. I., Korkut, S., Hiziroglu, S. y Sevik, H. (2014). An evaluation of properties of four heat treated wood species. *Industrial Crops and Products*, 60, 60-65.
- Kim, G. H., Yun, K. E. y Kim, J. J. (1998). Effect of heat treatment on the decay resistance and the bending properties of radiata pine sapwood. *Material und Organismen*, 32(2).
- Kocaefe, D., Poncsak, S., Doré, G. y Younsi, R. (2008a). Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. *Holz als roh-und werkstoff*, 66(5), 355-361.
- Kocaefe, D., Poncsak, S. y Boluk, Y. (2008b). Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. *BioResources*, 3(2), 517-537.
- Kocaefe, D., Poncsak, S., Tang, J. y Bouazara, M. (2010). Effect of heat treatment on the mechanical properties of North American jack pine: thermogravimetric study. *Journal of materials science*, 45(3), 681-687.
- Kocaefe, D., Huang, X., y Kocaefe, Y. (2015). Dimensional Stabilization of Wood. *Current Forestry Reports*, 1(3), 151-161.
- Kokutse, A. D., Brancheriau, L., y Chaix, G. (2010). Rapid prediction of shrinkage and fibre saturation point on teak (*Tectona grandis*) wood based on near-infrared spectroscopy. *Annals of forest science*, 67(4), 403.

- Korkut, S., Kök, M. S., Korkut, D. S., y Gürleyen, T. (2008). The effects of heat treatment on technological properties in Red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood. *Bioresource Technology*, 99(6), 1538-1543.
- Kookandeh, M. G., Taghiyari, H. R., y Siahposht, H. (2014). Effects of heat treatment and impregnation with zinc-oxide nanoparticles on physical, mechanical, and biological properties of beech wood. *Wood science and technology*, 48(4), 727-736.
- Kubojima, Y., Okano, T., y Ohta, M. (2000). Bending strength and toughness of heat-treated wood. *Journal of Wood Science*, 46(1), 8-15.
- Kuzman, M. K., Kutnar, A., Ayrilmis, N., y Kariz, M. (2015). Effect of heat treatment on mechanical properties of selected wood joints. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(5), 689-691.
- Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C. T., y Niemz, P. (2015). Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Science and Technology*, 1-16.
- Li, M. Y., Cheng, S. C., Li, D., Wang, S. N., Huang, A. M., y Sun, S. Q. (2015). Structural characterization of steam-heat treated *Tectona grandis* wood analyzed by FT-IR and 2D-IR correlation spectroscopy. *Chinese Chemical Letters*, 26(2), 221-225.
- Lionetto, F., Del Sole, R., Cannoletta, D., Vasapollo, G., y Maffezzoli, A. (2012). Monitoring wood degradation during weathering by cellulose crystallinity. *Materials*, 5(10), 1910-1922.
- Matsuo, M., Yokoyama, M., Umemura, K., Gril, J., Yano, K. I., y Kawai, S. (2010). Color changes in wood during heating: kinetic analysis by applying a time-temperature superposition method. *Applied physics A*, 99(1), 47-52.
- Mazela, B., Zakrzewski, R., Grześkowiak, W., Cofta, G., y Bartkowiak, M. (2004). Resistance of thermally modified wood to basidiomycetes. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 7(1), 1505-0297.
- Méndez-Mejías, L. D., y Moya, R. (2016). Effects on density, shrinking, color changing and chemical surface analysis through FTIR of *Tectona grandis* thermo-treated. *Scientia Forestalis* (Accepted).

- Mitsui, K., Murata, A., Kohara, M., y Tsuchikawa, S. (2003). Colour modification of wood by light-irradiation and heat treatment. *In First European Conference on Wood Modification*.
- Momohara, I., Ohmura, W., Kato, H., y Kubojima, Y. (2003). Effect of high-temperature treatment on wood durability against the Brown-rot fungus, *Fomitopsis palustris*, and the térmita, *Coptotermes formosanus*. *In 8th International IUFRO wood drying conference* (pp. 284-287).
- Moreno, J. R., y Roque, R. M. (2006). Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F.(teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(9), 50-63.
- Moya, R. (2004). Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New Forests*, 28(2-3), 299-307.
- Moya, R., y Tenorio, C. (2013). Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. *Biomass and Bioenergy*, 56, 14-21.
- Muñoz Acosta, F., Moreno, P., y Pablo, A. (2011). Evaluación de una unión laminada con adhesivo tipo PVA y maderas de plantación: *Acacia mangium*, *Tectona grandis* y *Terminalia amazonia*. *Revista Forestal Venezolana*, 33-41.
- Noh, N. M., y Ahmad, Z. (2016). Evaluation of Density for Malaysian Hardwood Timber Treated by Heat: The Case of Pauh Kijang (*Irvingia spp.*) and Kapur (*Dryobalanops spp.*). *In InCIEC 2015* (pp. 759-767). Springer Singapore.
- Noh, N. I. F. M., Ahmad, Z., y Mustaffa, N. K. (2016). Effect of Heat Treatment on Timbers—A Review. *In Regional Conference on Science, Technology and Social Sciences (RCSTSS 2014)* (pp. 57-67). Springer Singapore.
- Olarescu, M. C., Campean, M., Ispas, M., y Cosereanu, C. (2014). Effect of thermal treatment on some properties of lime wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(4), 559-562.
- Ortiz, R., Párraga, M., Navarrete, J., Carrasco, I., de la Vega, E., Ortiz, M., y Blanchette, R. A. (2014). Investigations of biodeterioration by fungi in historic wooden churches of Chiloé, Chile. *Microbial ecology*, 67(3), 568-575.

- Paul, W., Ohlmeyer, M., y Leithoff, H. (2007). Thermal modification of OSB-strands by a one-step heat pre-treatment–Influence of temperature on weight loss, hygroscopicity and improved fungal resistance. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 65(1), 57-63.
- Priadi, T., y Hiziroglu, S. (2013). Characterization of heat treated wood species. *Materials & Design*, 49, 575-582.
- Salas, C. y Moya, R. (2014). Kiln-, Solar-, and air-drying behavior of lumber of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* from fast-grown plantations: moisture content, wood color, and drying defects. *Drying technology: An international journal*, 32 (3), 301-310.
- Salca, E. A., Kobori, H., Inagaki, T., Kojima, Y., y Suzuki, S. (2016). Effect of heat treatment on colour changes of black alder and beech veneers. *Journal of Wood Science*, 1-8.
- Serrano, R., y Moya, R. (2013). Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. Editorial Académica Española, ISBN: 3659071137. Madrid España, 64 p.
- Süleyman K. (2012). Performance of three thermally treated tropical wood species commonly used in Turkey. *Industrial Crops and Products*, 36(1), 355-362.
- Spiegelberg, H. L. (1966). The effect of hemicelluloses on the mechanical properties of individual pulp fibers. *Tappi*, 49(9), 388-396.
- Straže, A., Fajdiga, G., Pervan, S., y Gorišek, Ž. (2016). Hygro-mechanical behavior of thermally treated beech subjected to compression loads. *Construction and Building Materials*, 113, 28-33.
- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M., y Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican tropical climates. *BioResources*, 10(1), 482-498.
- Uribe, B. E. B., y Ayala, O. A. (2015). Characterization of three wood species (Oak, Teak and Chanul) before and after heat treatment. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 12(1), 54-62.
- Venäläinen, M., Partanen, H., y Harju, A. (2014). The strength loss of Scots pine timber in an accelerated soil contact test. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 86, 150-152.

- Welzbacher, R.C., Brischke, C., y Otto Rapp, A. (2007). Influence of treatment temperature and duration on selected biological, mechanical, physical and optical properties of thermally modified timber. *Wood Material Science and Engineering*, 2(2), 66-76.
- Windeisen, E., y Wegener, G. (2008). Behaviour of lignin during thermal treatments of wood. *Industrial crops and products*, 27(2), 157-162.
- Yildiz, S., Gezer, E. D., y Yildiz, U. C. (2006). Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and environment*, 41(12), 1762-1766.
- Yildiz, S., Tomak, E. D., Yildiz, U. C., y Ustaomer, D. (2013). Effect of artificial weathering on the properties of heat treated wood. *Polymer degradation and stability*, 98(8), 1419-1427.
- Zobel, B. J., y Sprague, J. R. (2012). Juvenile wood in forest trees. *Springer Science & Business Media*.